

**Tata cara mengestimasi kekuatan beton  
dengan metode maturitas**

***Standard practice for estimating concrete strength  
by the maturity method***

(ASTM C1074 – 11, IDT)





© ASTM 2011 – All rights reserved

© BSN 2014 untuk kepentingan adopsi standar © ASTM menjadi SNI – Semua hak dilindungi

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh isi dokumen ini dengan cara dan dalam bentuk apapun serta dilarang mendistribusikan dokumen ini baik secara elektronik maupun tercetak tanpa izin tertulis BSN

**BSN**  
Gd. Manggala Wanabakti  
Blok IV, Lt. 3,4,7,10.  
Telp. +6221-5747043  
Fax. +6221-5747045  
Email: [dokinfo@bsn.go.id](mailto:dokinfo@bsn.go.id)  
[www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)

Diterbitkan di Jakarta



## Daftar isi

Daftar isi .....	i
Prakata .....	ii
Pendahuluan .....	ii
1. Ruang lingkup.....	1
2. Dokumen referensi .....	1
3. Terminologi .....	2
4. Ringkasan tata cara.....	4
6. Persamaan maturitas .....	5
7. Peralatan .....	6
8. Prosedur menentukan hubungan kekuatan-maturitas .....	6
9. Prosedur untuk mengestimasi kekuatan in-situ .....	10
10. Presisi dan bias.....	12
11. Kata kunci .....	12
Tambahan A1. Penentuan temperatur datum atau energi aktivasi.....	13
Lampiran X1. Persamaan maturitas .....	18
Gambar 1 Contoh grafik hubungan antara kekuatan tekan dan faktor temperatur – waktu... 8	
Gambar 2 Contoh dari suatu grafik hubungan antara kekuatan tekan dan umur ekivalen pada 20°C..... 9	
Gambar 3 Contoh kekuatan tekan sebagai fungsi dari logaritma umur ekivalen..... 10	
Gambar A1.1 Satu perkekuatan versus satu per umur setelah waktu pengikatan akhir..... 15	
Gambar A1. 2 Contoh penggambaran nilai-nilai k versus temperatur perawatan untuk menentukan temperatur datum .....	16
Gambar A1.3 Contoh penggambaran Ln (K) versus 1/Temperatur mutlak untuk menentukan nilai Q yang digunakan pada perhitungan umur ekivalen .....	17
Gambar X2.1 Riwayat temperatur Hipotetis yang digunakan untuk ilustrasi perhitungan faktor temperatur-waktu dan umur ekivalen .....	20
Tabel X2. 1 Contoh perhitungan maturitas .....	22



## Prakata

Tata cara untuk mengestimasi kekuatan beton dengan metode maturitas adalah revisi SNI 03-6809-2002 adopsi identik dari ASTM C1074-11, *Standard practice for estimating concrete strength by the maturitas method* yang digunakan sebagai acuan untuk mengestimasi kekuatan beton dengan metode maturitas, sehingga pada pelaksanaannya dapat memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

Standar Nasional Indonesia (SNI) ini dipersiapkan oleh Panitia Teknik 91-01 Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil melalui Subpanitia Teknis 91-01-S4 Bahan, Sain, Struktur dan Konstruksi Bangunan.

Tata cara penulisan disusun mengikuti Pedoman PSN 10:2012 dan telah dibahas dalam forum rapat konsensus pada tanggal 22 April 2013 di Bandung. Forum rapat konsensus ini dihadiri oleh wakil dari produsen, konsumen, asosiasi, lembaga penelitian, perguruan tinggi dan instansi pemerintah terkait.





## Pendahuluan

Standar ini berisi prosedur untuk mengestimasi kekuatan beton dengan metode maturitas dimana indeks maturitas dinyatakan dalam faktor temperatur-waktu atau dalam umur ekuivalen pada temperatur yang disyaratkan.

Standar ini menguraikan persamaan maturitas, peralatan dan prosedur untuk mengembangkan hubungan kekuatan-maturitas dan untuk mengestimasi kekuatan beton in-situ. Penetapan hubungan kekuatan-maturitas disyaratkan dari campuran beton di laboratorium dan catatan riwayat temperatur beton yang kekuatannya akan diestimasi.

Temperatur 20°C yang disebutkan pada Gambar 2, Contoh grafik hubungan antar kekuatan tekan dan umur ekuivalen pada temperatur 20°C dalam standar ini adalah sebagai contoh, untuk penggunaan di Indonesia dapat diambil temperatur yang berbeda.





## Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method

## Tata cara mengestimasi kekuatan beton dengan metode maturitas

### 1. Scope

**1.1** This practice provides a procedure for estimating concrete strength by means of the maturity method. The maturity index is expressed either in terms of the temperature-time factor or in terms of the equivalent age at a specified temperature.

**1.2** This practice requires establishing the strength-maturity relationship of the concrete mixture in the laboratory and recording the temperature history of the concrete for which strength is to be estimated.

**1.3** The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

**1.4** This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (Warning-Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to skin and tissue upon prolonged exposure.

### 1. Ruang lingkup

**1.1** Tata cara ini berisi prosedur untuk mengestimasi kekuatan beton dengan metode maturitas. Indeks maturitas dinyatakan dalam faktor temperatur-waktu atau dalam umurekuivalen pada temperatur yang disyaratkan.

**1.2.** Tata cara ini mensyaratkan penetapan hubungan kekuatan-maturitas dari campuran beton di laboratorium dan catatan riwayat temperatur beton yang kekuatannya akan diestimasi.

**1.3** Nilai-nilai dinyatakan dalam satuan SI yang dianggap sebagai standar. Tidak ada satuan ukuran lain yang dicakup dalam standar ini.

**1.4** Peringatan bahaya atas keselamatan berikut hanya berkaitan dengan bagian metode uji spesifikasi ini: Standar ini tidak dimaksudkan untuk mengatasi semua masalah keselamatan, jika ada, yang terkait dengan penggunaannya. Pengguna standar ini bertanggungjawab untuk menetapkan praktik yang tepat untuk keselamatan dan kesehatan dan menentukan batasan penerapan peraturan sebelum digunakan.

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

C311/C31M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field

C39/C39M Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

C78 Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)

C109/C109M Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars

### 2. Dokumen referensi

#### 2.1 Standar ASTM

ASTM C31/C31M, *Practice for making and curing concrete test specimens in the field.*

ASTM C39/C39M, *Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.*

ASTM C78, *Test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with third-point loading).*

ASTM C109/C109M, *Test method for compressive strength of hydraulic cement*



(Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

*mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens).*

C192/C 192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

*ASTM C192/C192M, Practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory.*

C403/C403M Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance

*ASTM C403/C403M, Test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance.*

C511 Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes

*ASTM C511, Specification for mixing rooms, moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes.*

C684 Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens

*ASTM 684, Test method for making, accelerated curing, and testing concrete compression test specimens.*

C803/C803M Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete

*ASTM C803/C803M, Test method for penetration resistance of hardened concrete.*

C873/C873M Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds

*ASTM C873/C873M, Test method for compressive strength of concrete cylinders cast in place in cylindrical molds.*

C900 Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete

*ASTM C900, Test method for pullout strength of hardened concrete.*

C918/C918M Test Method for Measuring Early-Age Compressive Strength and Projecting Later-Age Strength

*ASTM C918/C918M, Test method for measuring early-age compressive strength and projecting later-age strength.*

### 3. Terminology

### 3. Terminologi

**3.1 Definitions of Terms Specific to This Standard:**

**3.1 Definisi istilah spesifik pada standar ini:**

**3.1.1 datum temperature** – the temperature that is subtracted from the measured concrete temperature for calculating the temperature-time factor according to Eq 1.

**3.1.1 temperatur datum** – Nilai yang dikurangkan pada temperatur beton yang diukur untuk menghitung faktor temperatur-waktu sesuai Persamaan 1.

**3.1.2 equivalent age** – the number of days or hours at a specified temperature required to produce a maturity equal to the maturity achieved by a curing period at temperatures different from the specified temperature.

**3.1.2 umur ekuivalen** – Jumlah hari atau jam pada suatu temperatur spesifik yang dibutuhkan untuk menghasilkan maturitas yang sama dengan maturitas yang dicapai oleh suatu periode perawatan pada temperatur yang berbeda dari temperatur spesifik tersebut.

**3.1.3 maturity** – the extent of the development of a property of a cementitious

**3.1.3 maturitas** – Tingkat perkembangan suatu properti dari campuran sementisius.



mixture.

**3.1.3.1 discussion** – While the term is used usually to describe the extent of relative strength development, it can also be applied to the evolution of other properties that are dependent on the chemical reactions that occur in a cementitious mixture. At any age, maturity depends on the curing history.

**3.1.4 maturity function** – a mathematical expression that uses the measured temperature history of a cementitious mixture during the curing period to calculate an index that is indicative of the maturity at the end of that period. Refer to Appendix XI for additional discussion of this term.

**3.1.5 maturity index** – an indicator of maturity that is calculated from the temperature history of the cementitious mixture by using a maturity function.

**3.1.5.1 discussion** – The computed index is indicative of maturity provided there has been a sufficient supply of water for hydration or pozzolanic reaction of the cementitious materials during the time used in the calculation. Two widely used maturity indexes are the temperature-time factor and the equivalent age.

**3.1.6 maturity method** – a technique for estimating concrete strength that is based on the assumption that samples of a given concrete mixture attain equal strengths if they attain equal values of the maturity index (1, 2, 3).

**3.1.7 strength-maturity relationship** – an empirical relationship between compressive strength and maturity index that is obtained by testing specimens whose temperature history up to the time of test has been recorded.

**3.1.8. temperature-time factor** – the maturity index computed according to Eq 1.

### 3.1.3.1 diskusi

Istilah maturitas biasanya digunakan untuk menggambarkan tingkat perkembangan kekuatan relatif, juga dapat diterapkan pada evolusi properti-properti lain yang bergantung pada reaksi kimia yang terjadi dalam campuran sementisius. Pada sembarang umur, maturitas tergantung pada riwayat perawatan.

**3.1.4 persamaan maturitas** – Suatu persamaan matematis yang menggunakan riwayat temperatur yang diukur dari suatu campuran selama periode perawatan untuk menghitung indeks yang menunjukkan maturitas pada akhir periode itu. Lihat Lampiran X1 untuk diskusi tambahan tentang istilah ini.

**3.1.5 indeks maturitas** – Suatu indikator maturitas yang dihitung dari riwayat temperatur suatu campuran sementisius dengan menggunakan suatu persamaan maturitas.

**3.1.5.1 diskusi** – Indeks maturitas mengindikasikan maturitas yang dihasilkan dengan kecukupan pasokan air untuk hidrasi atau reaksi pozzolanik bahan sementisius selama waktu yang digunakan pada perhitungan. Dua indeks maturitas yang banyak digunakan adalah faktor temperatur-waktu dan umur ekuivalen.

**3.1.6 Metode maturitas** – Suatu teknik untuk mengestimasi kekuatan beton berdasarkan asumsi bahwa sampel-sampel dari suatu campuran beton mencapai kekuatan yang sama jika mencapai nilai indeks maturitas yang sama (1, 2, 3).

**3.1.7 Hubungan kekuatan-maturitas** – Hubungan empiris antara kekuatan tekan dan indeks maturitas yang diperoleh dari pengujian spesimen yang tercatat riwayat temperaturnya sampai saat pengujian dilakukan.

**3.1.8 faktor temperatur-waktu** – Indeks maturitas yang dihitung sesuai Persamaan 1.



#### 4. Summary of Practice

**4.1** A strength-maturity relationship is developed by laboratory tests on the concrete mixture to be used.

**4.2** The temperature history of the field concrete, for which strength is to be estimated, is recorded from the time of concrete placement to the time when the strength estimation is desired.

**4.3** The recorded temperature history is used to calculate the maturity index of the field concrete.

**4.4** Using the calculated maturity index and the strength maturity relationship, the strength of the field concrete is estimated.

#### 5. Significance and Use

**5.1** This practice can be used to estimate the in-place strength of concrete to allow the start of critical construction activities such as:

- (1) removal of formwork and reshoring;
- (2) post-tensioning of tendons;
- (3) termination of cold weather protection; and
- (4) opening of roadways to traffic.

**5.2** This practice can be used to estimate strength of laboratory specimens cured under non standard temperature conditions.

**5.3** The major limitations of the maturity method are:

- (1) the concrete must be maintained in a condition that permits cement hydration;
- (2) the method does not take into account the effects of early-age concrete temperature on the long-term strength; and
- (3) the method needs to be supplemented by other indications of the potential strength of the concrete mixture.

**5.4** The accuracy of the estimated strength depends, in part, on using the appropriate maturity function for the particular concrete

#### 4. Ringkasan tata cara

**4.1** Hubungan kekuatan-maturitas dikembangkan dari hasil uji laboratorium untuk suatu campuran beton tertentu.

**4.2** Riwayat temperatur dari beton lapangan, yang kekuatannya harus diestimasi, dicatat sejak saat beton dituang sampai saat estimasi kekuatan yang diinginkan.

**4.3** Riwayat temperatur yang dicatat digunakan untuk menghitung indeks maturitas beton lapangan.

**4.4** Kekuatan beton lapangan diestimasi dengan menggunakan indeks maturitas yang sudah dihitung dan hubungan kekuatan-maturitas.

#### 5. Signifikansi dan kegunaan

**5.1** Standar ini dapat digunakan untuk mengestimasi kekuatan beton in-situ untuk pemberian ijin dimulainya kegiatan konstruksi yang kritis seperti:

- (1) pelepasan cetakan dan pemasangan kembali penyangga sementara;
- (2) penarikan kabel prategang;
- (3) pengakhiran proteksi terhadap cuaca dingin;
- (4) pembukaan jalan raya untuk dilalui lalu lintas.

**5.2** Standar ini dapat digunakan untuk mengestimasi kekuatan spesimen laboratorium yang dirawat dengan kondisi temperatur non-standar.

**5.3** Keterbatasan utama untuk metode maturitas adalah:

- (1) beton harus dijaga pada kondisi hidrasi semen tetap berlangsung;
- (2) metode ini tidak memperhitungkan efek temperatur beton umur muda pada kekuatan jangka panjang;
- (3) metode ini perlu dilengkapi dengan indikasi-indikasi lain tentang kekuatan potensial campuran beton.

**5.4** Akurasi kekuatan yang diestimasi juga tergantung pada penggunaan persamaan maturitas yang sesuai dengan campuran



mixture. Annex A1 provides a procedure for determining experimentally the best parameters (datum temperature or value of Q) for the maturity functions described in Section 6.

## 6 Maturity Functions

**6.1** There are two alternative functions for computing the maturity index from the measured temperature history of the concrete.

**6.2** One maturity function is used to compute the temperature-time factor as follows:

$$M(t) = \sum (T_a - T_o) \Delta t \quad (1)$$

where:

$M(t)$  = the temperature-time factor at age  $t$ , degree-days or degree-hours,  
 $\Delta t$  = a time interval, days or hours,  
 $T_a$  = average concrete temperature during time interval,  $\Delta t$ , °C, and  
 $T_o$  = datum temperature, °C

**6.3** The other maturity function is used to compute equivalent age at a specified temperature as follows (4):

$$t_e = \sum e^{-Q \left( \frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right) \Delta t} \quad (2)$$

where:

$t_e$  = equivalent age at a specified temperature  $T_s$ , days or h,  
 $Q$  = activation energy divided by the gas constant, K,  
 $T_a$  = average temperature of concrete during time interval  $\Delta t$ , K,  
 $T_s$  = specified temperature, K, and  
 $\Delta t$  = time interval, days or h.

**Note 1** – Temperature in Kelvin (K) equals approximately temperature °C + 273°C.

**6.4** Approximate values of the datum temperature,  $T_o$ , and the activation energy divided by the gas constant,  $Q$ , are given in

betonnya. Lampiran A1 berisi prosedur untuk menentukan parameter yang paling baik secara eksperimental (temperatur datum atau nilai Q) untuk persamaan maturitas pada Pasal 6.

## 6. Persamaan maturitas

**6.1** Terdapat dua fungsi alternatif untuk menghitung indeks maturitas dari riwayat temperatur beton yang diukur.

**6.2** Satu persamaan maturitas yang digunakan untuk menghitung faktor temperatur-waktu adalah:

$$M(t) = \sum (T_a - T_o) \Delta t \quad (1)$$

keterangan:

$M(t)$  = faktor temperatur-waktu pada umur  $t$ , derajat-hari atau derajat-jam,  
 $\Delta t$  = suatu interval waktu, hari atau jam,  
 $T_a$  = temperatur beton rata-rata selama interval waktu,  $\Delta t$ , °C, dan  
 $T_o$  = temperatur datum, °C.

**6.3** Persamaan maturitas kedua yang digunakan untuk menghitung umur ekuivalen pada temperatur yang ditentukan adalah (4):

$$t_e = \sum e^{-Q \left( \frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right) \Delta t} \quad (2)$$

keterangan:

$t_e$  = umur ekuivalen pada temperatur yang ditetapkan  $T_s$ , hari atau jam,  
 $Q$  = energi aktivasi dibagi dengan konstanta gas, K,  
 $T_a$  = temperatur beton rata-rata selama interval waktu  $\Delta t$ , K,  
 $T_s$  = temperatur yang ditetapkan, K, dan  
 $\Delta t$  = interval waktu, hari atau jam.

**CATATAN1** – Temperatur dalam kelvin (K) kira-kira sama dengan temperatur °C + 273 °C.

**6.4** Nilai pendekatan temperatur datum,  $T_o$ , dan energi aktivasi dibagi dengan konstanta gas,  $Q$ , sesuai Lampiran X1. Bila diinginkan



Appendix XI. Where maximum accuracy of strength estimation is desired, the appropriate Value is of  $T_0$  or  $Q$  for a specific concrete mixture are determined according to the procedures given in Annex A1.

akurasi maksimum kekuatan yang diestimasi, nilai-nilai  $T_0$  atau  $Q$  yang sesuai untuk suatu campuran beton yang spesifik ditentukan sesuai prosedur pada Lampiran A1.

## 7. Apparatus

**7.1** A device is required to monitor and record the concrete temperature as a function of time and compute the maturity index in accordance with Eq 1 or Eq 2.

**Note 2** - Acceptable devices include commercial maturity instruments that monitor temperature and compute and display either temperature-time factor or equivalent age. Some commercial maturity instruments use fixed values of datum temperature or activation energy in evaluating the maturity index; thus the displayed maturity index may not be indicative of the true value for the concrete mixture being used. Refer to Appendix X1 for information on correcting displayed time-temperature values for another value of datum temperature. Equivalent-age values displayed by a maturity instrument cannot be adjusted for another activation energy value.

**7.2** Alternative devices include temperature sensors connected to data-loggers, or embedded digital devices that measure, record, and store temperature data as a function of time. The temperature data are used to calculate the maturity Index according to Eq 1 or Eq 2.

**7.3** The time interval between temperature measurements shall be  $\frac{1}{2}$  h or less for the first 48 h and 1 h or less thereafter. The temperature recording device shall be accurate to within  $\pm 1$  °C.

## 8. Procedure to Develop Strength-Maturity Relationship

**8.1** Prepare at least 15 cylindrical specimens according to Practice C192/C192M. The mixture proportions and constituents of the concrete shall be similar to those of the concrete whose strength will be estimated

## 7. Peralatan

**7.1** Diperlukan peralatan untuk memonitor dan mencatat temperatur beton sebagai fungsi dari waktu dan menghitung indeks maturitas sesuai Persamaan 1 atau Persamaan 2.

**CATATAN 2** – Peralatan mencakup instrumen maturitas komersial yang memonitor temperatur dan menghitung serta tampilan faktor temperatur-waktu atau umur ekivalen. Beberapa instrumen maturitas komersial menggunakan nilai yang konstan untuk temperatur datum atau energi aktivasi dalam menghitung indeks maturitas; sehingga indeks maturitas yang ditampilkan kemungkinan tidak menunjukkan nilai yang benar untuk campuran beton tersebut. Lihat Lampiran X1 untuk informasi mengenai koreksi nilai waktu-temperatur yang ditampilkan untuk nilai temperatur datum yang lain. Nilai umur ekivalen yang ditampilkan oleh peralatan maturitas tidak dapat disesuaikan untuk nilai energi aktivasi yang lain.

**7.2** Peralatan alternatif mencakup sensor temperatur yang dihubungkan ke data-logger, atau peralatan digital terpasang yang mengukur, mencatat, dan menyimpan data temperatur sebagai fungsi dari waktu. Data temperatur digunakan untuk menghitung indeks maturitas sesuai Persamaan 1 atau Persamaan 2.

**7.3** Interval waktu untuk pengukuran temperatur harus  $\frac{1}{2}$  jam atau kurang untuk 48 jam pertama dan setelah itu 1 jam atau kurang. Peralatan pencatat temperatur harus memiliki akurasi  $\pm 1$  °C.

## 8. Prosedur menentukan hubungan kekuatan-maturitas

**8.1** Siapkan paling sedikit 15 spesimen silinder sesuai ASTM C192/C192M. Proporsi campuran dan bahan-bahan untuk membuat beton harus sama dengan campuran beton yang akan diestimasi kekuatannya dengan



using this practice. If two batches are needed to prepare the required number of cylinders, cast an equal number of cylinders from each batch, and test one cylinder from each batch at the test ages given in 8.4.

**8.2** Embed temperature sensors to within  $\pm 15$  mm of the centers of at least two specimens. Immediately connect the sensors to maturity instruments or to temperature-recording devices such as data-loggers or strip-chart recorders.

**NOTE 3**—A method to assist in the proper positioning of the sensor is to insert a small diameter rigid rod into the center of the freshly made cylinder. The rod will push aside any interfering aggregate particles. The rod is removed and the sensor is inserted into the cylinder. The side of the cylinder mold should be tapped with a rubber mallet or the tamping rod to ensure that the concrete comes into contact with the sensor.

**8.3** Moist cure the specimens in a water bath or in a moist room meeting the requirements of Specification C511.

**8.4** Unless specified otherwise, perform compression tests at ages of 1, 3, 7, 14, and 28 days in accordance with Test Method C39/C39M. Test two specimens at each age and compute the average strength. If the range of compressive strength of the two specimens exceeds 10 % of their average strength, test another cylinder and compute the average of the three tests. If a low test result is due to an obviously defective specimen, discard the low test result.

**NOTE 4** — For concrete mixtures with rapid strength development, or when strength estimates are to be made at low values of maturity index, tests should begin as soon as practicable. Subsequent tests should be scheduled to result in approximately equal increments of strength gain between test ages. At least five test ages should be used.

**8.5** At each test age, record the average maturity index for the instrumented specimens.

**8.5.1** If maturity instruments are used, record the average of the displayed values.

menggunakan standar ini. Jika dua batch diperlukan untuk menyiapkan jumlah silinder yang dibutuhkan, cor jumlah silinder yang sama dari setiap batch, dan uji satu silinder dari setiap batch pada umur uji sesuai 8.4.

**8.2** Tanam sensor temperatur sedalam  $\pm 15$  mm dari tengah-tengah paling sedikit dua spesimen. Segerahubungkan sensor ke instrumen maturitas atau ke peralatan pencatat temperatur misalnya data-logger atau pencatat dengan kertas grafik.

**CATATAN 3**—Metode untuk memposisikan sensor secara benar adalah dengan menyisipkan batang kaku berdiameter kecil ke tengah silinder beton segar. Batang tersebut akan mendorong kesamping partikel-partikel agregat yang mengganggu. Batang tersebut kemudian dicabut dan sensor disisipkan ke dalam silinder. Samping cetakan silinder harus diketuk dengan palu karet atau batang pemadat untuk menjamin kontak antara beton dengan sensor.

**8.3** Berikan perawatan basah pada spesimen dengan direndam dalam air atau disimpan di dalam ruang lembab sesuai ASTM C511.

**8.4** Kecuali ditentukan lain, lakukan uji tekan pada umur 1, 3, 7, 14, dan 28 hari sesuai ASTM C39/C39M. Uji dua spesimen pada setiap umur dan hitung kekuatan rata-ratanya. Jika rentang kekuatan tekan dari kedua spesimen berbeda lebih 10% dari kekuatan rata-ratanya, uji silinder lain dan hitung kekuatan rata-rata dari ketiga spesimen uji. Apabila ada hasil uji yang terlalu rendah, abaikan hasil uji tersebut.

**CATATAN 4** — Untuk campuran beton dengan perkembangan kekuatan yang cepat, atau bila estimasi kekuatan dibuat untuk nilai indeks maturitas yang rendah, pengujian harus dimulai sesegera mungkin. Pengujian lanjutan harus dijadwalkan agar menghasilkan kenaikan kekuatan yang kira-kira sama di antara umur-umur uji. Paling sedikit gunakan lima umur uji.

**8.5** Pada setiap umur uji, catat indeks maturitas rata-rata untuk spesimen yang dipasang instrumen.

**8.5.1** Jika digunakan instrumen maturitas, catat nilai rata-rata yang terdisplay.



**8.5.2** If temperature recorders are used, evaluate the maturity index according to Eq. 1 or Eq 2; Unless specified otherwise, use a time interval ( $\Delta t$ ) of  $\frac{1}{2}$  h or less for the first 48 h of the temperature record. Longer time intervals are permitted for the relatively constant portion of the subsequent temperature record.

**NOTE 5** – Judgement should be used in selecting the initial time intervals to record temperature in mixtures that result in rapid changes in early-age temperature due to rapid hydration. Appendix X2 gives an example of how to evaluate the temperature-time factor or equivalent age from the recorded temperature history of the concrete.

**8.6** Plot the average compressive strength as a function of the average value of the maturity index. Draw a best-fit curve through the data. The resulting curve is the strength-maturity relationship to be used for estimating the strength of the concrete mixture cured under other temperature conditions. Fig. 1 is an example of a relationship between compressive strength and temperature-time factor, and Fig. 2 is an example of a relationship between compressive strength and equivalent age at 20°C.

**8.5.2** Jika digunakan pencatat temperatur, evaluasi indeks maturitas sesuai Persamaan 1 atau Persamaan 2. Kecuali ditentukan lain, untuk pencatatan temperatur 48 jam pertama, gunakan interval waktu ( $\Delta t$ )  $\frac{1}{2}$  jam atau kurang. Untuk pencatatan temperatur selanjutnya diperbolehkan interval waktu yang lebih lama dan relatif konstan jaraknya.

**CATATAN 5** – Harus ditetapkan interval waktu awal untuk pencatatan perubahan temperatur dalam campuran beton umur muda akibat hidrasi yang berlangsung cepat. Lampiran X2 berisi contoh untuk mengevaluasi faktor temperatur-waktu atau umur ekuivalen dari catatan riwayat temperatur beton.

**8.6** Plot kekuatan tekan rata-rata sebagai fungsi dari nilai rata-rata indeks maturitas. Gambar kurva terbaik melalui data. Kurva yang dihasilkan adalah hubungan kekuatan-maturitas yang akan digunakan untuk mengestimasi kekuatan campuran beton yang dirawat pada kondisi temperatur berbeda. Gambar 1 adalah sebuah contoh hubungan antara kekuatan tekan dan faktor temperatur-waktu, dan Gambar 2 adalah sebuah contoh untuk hubungan antara kekuatan tekan dan umur ekuivalen pada 20°C.

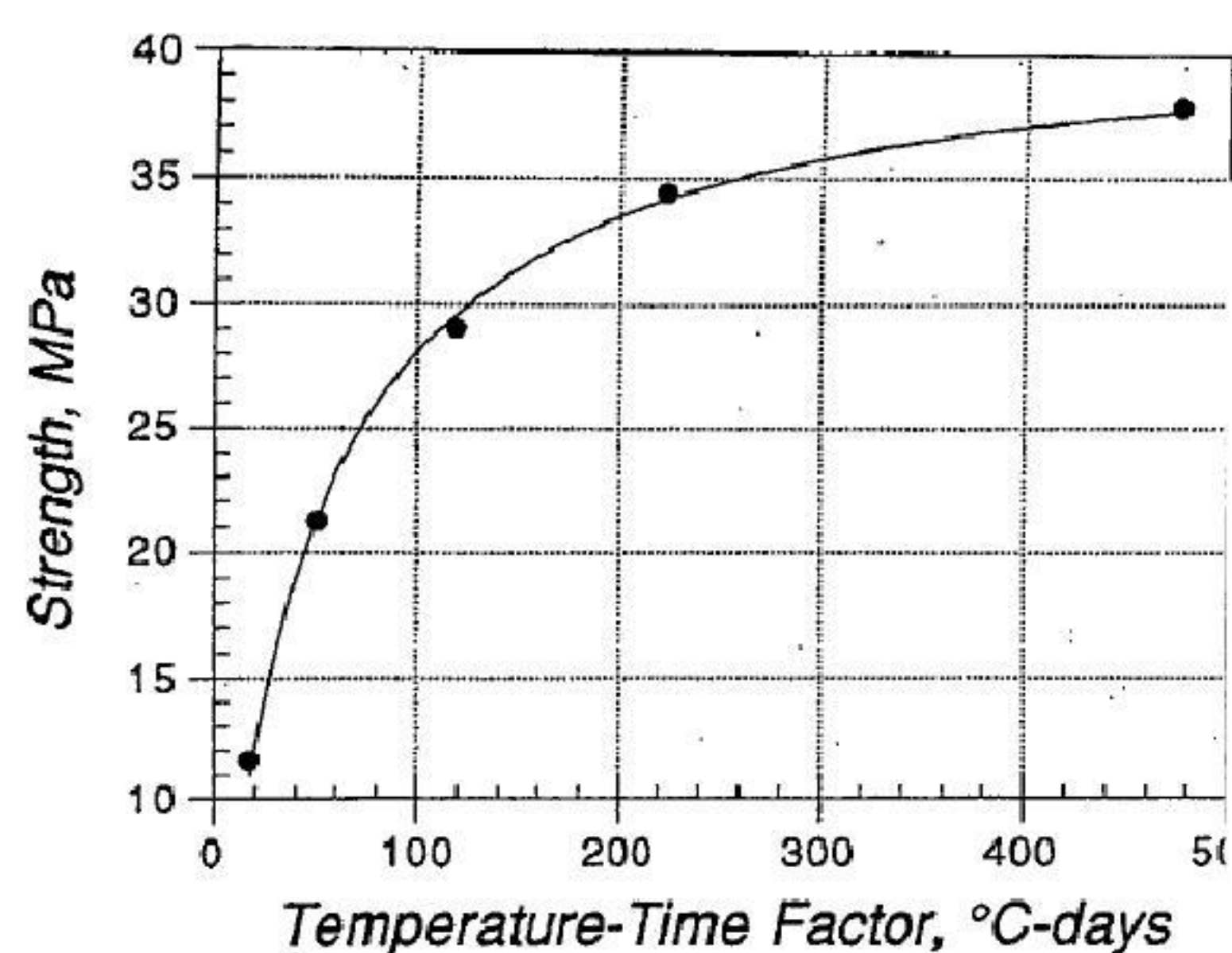
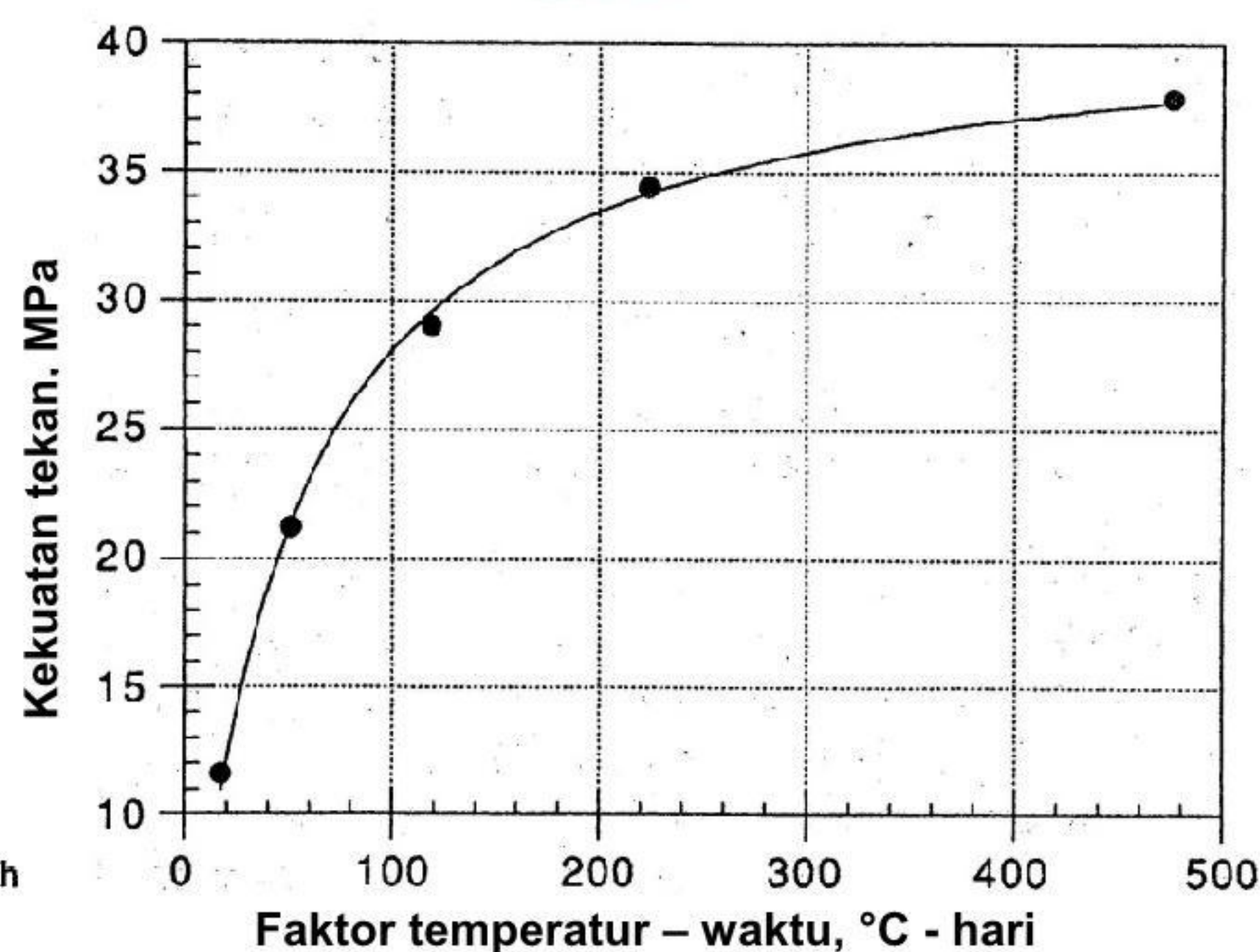


FIG. 1 Example of a Relationship Between Compressive Strength and Temperature-Time Factor



Gambar 1 Contoh grafik hubungan antara kekuatan tekan dan faktor temperatur – waktu



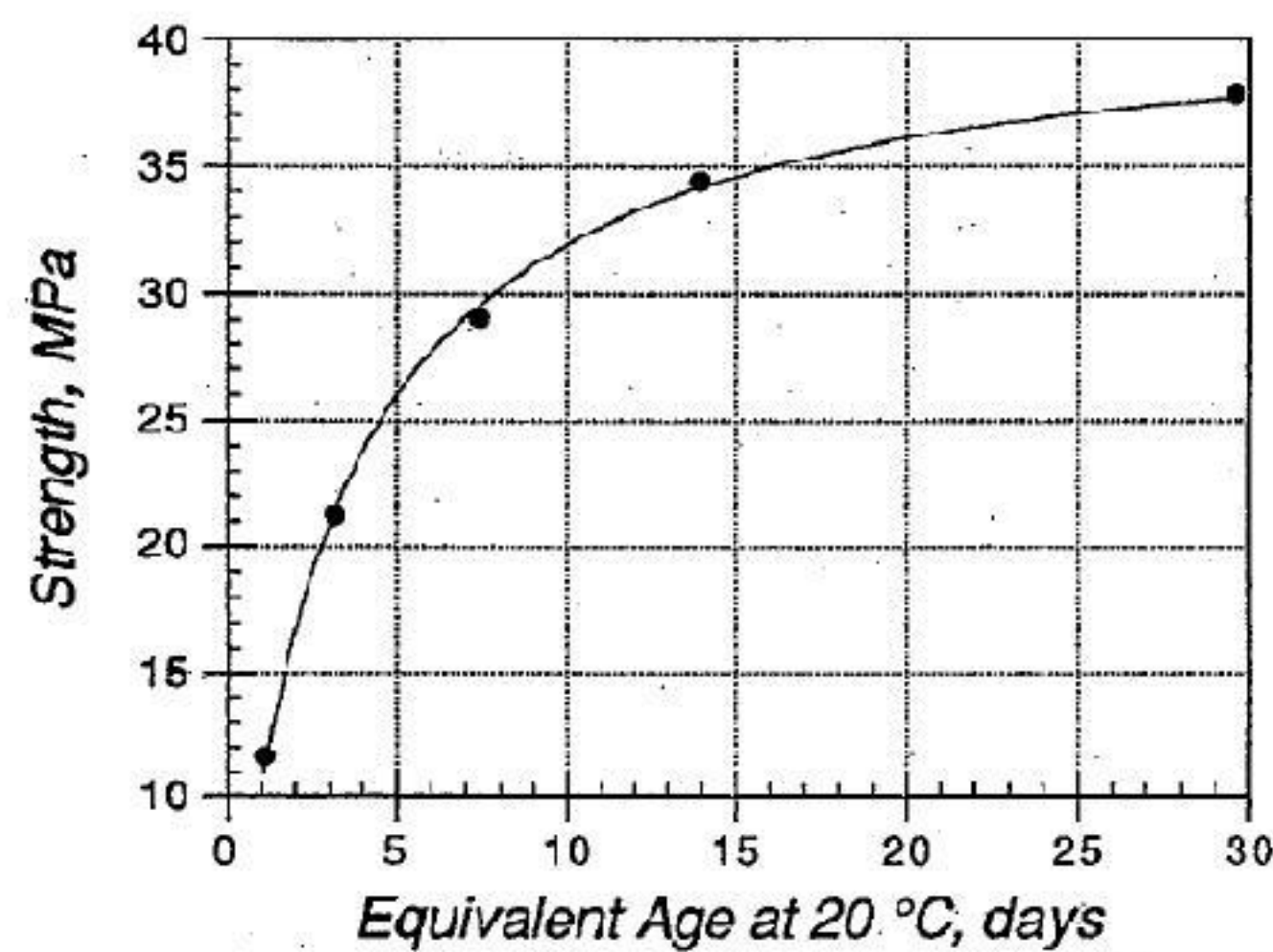
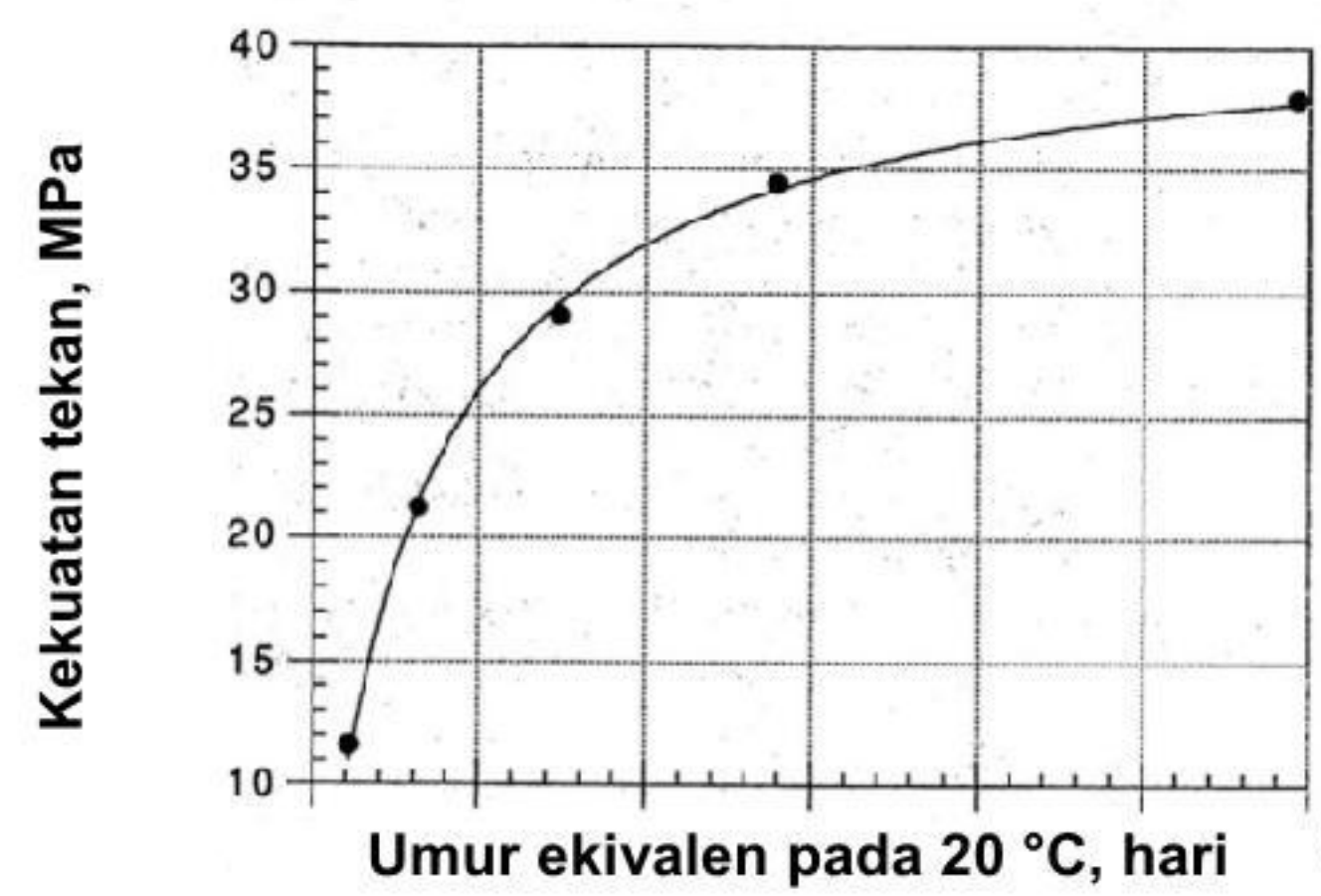


FIG. 2 Example of a Relationship Between Compressive Strength and Equivalent Age at 20 °C

**NOTE 6** – The strength-maturity relationship can also be established by using regression analysis to determine a best-fit equation to the data. Possible equations that have been found to be suitable for this purpose may be found in Ref. (3). A popular equation is to express strength as a linear function of the logarithm of the maturity index (see Fig. 3).

**8.7** When specified, a flexural strength versus maturity index relationship is permitted. Prepare at least 15 beam specimens in accordance with Practice C192/C192M. If two batches are needed to prepare the required number of specimens, cast an equal number of beams from each batch, and test one beam from each batch at the test ages given in 8.4. Embed temperature sensors in two specimens, one from each batch if two batches are made. Connect the sensors to maturity instruments or temperature recording devices, and moist cure the specimens in a water bath or in a moist room meeting the requirements of Specification C511. Measure flexural strength in accordance with Test Method C78 at time intervals of 1, 3, 7, 14 and 28 days, or as specified otherwise (See Note 4). Test two specimens at each age and compute the average strength. If the range of flexural strength of the two specimens exceeds 15 % of their average strength, test another beam and compute the average of the three tests. If a low test result is due to an obviously defective specimen; discard the low test result. Use the same procedures as in 8.5 and 8.6 to develop the flexural strength-maturity relationship.



Gambar 2 Contoh dari suatu grafik hubungan antara kekuatan tekan dan umur ekuivalen pada 20°C

**CATATAN 6** – Hubungan kekuatan-maturitas juga dapat ditetapkan dengan menggunakan analisis regresi untuk menentukan persamaan yang paling mewakili data-data. Persamaan-persamaan yang ditemukan dan sesuai dengan keperluan ini dapat dilihat pada Referensi (3). Sebuah persamaan yang populer untuk mengekspresikan kekuatan sebagai fungsi linier dari logaritma indeks maturitas (lihat Gambar 3).

**8.7** Bila disyaratkan, diperbolehkan hubungan antara kekuatan lentur versus indeks maturitas. Siapkan paling sedikit 15 spesimen balok sesuai ASTM C192/C192M. Jika diperlukan dua *batch* untuk menyiapkan jumlah spesimen yang disyaratkan, cetak jumlah balok yang sama dari setiap *batch*, dan uji satu balok dari setiap *batch* pada umur uji sesuai 8.4. Tanam sensor temperatur pada dua spesimen, satu untuk setiap *batch* jika dibuat dua *batch*. Sambungkan sensor ke instrumen maturitas atau peralatan pencatat temperatur, dan berikan perawatan lembab pada spesimen dengan direndam dalam air atau letakkan dalam ruangan lembab sesuai ASTM C511. Ukur kekuatan lentur sesuai ASTM C78 pada interval waktu 1, 3, 7, 14 dan 28 hari, atau sesuai yang disyaratkan (Lihat Catatan 4). Uji dua spesimen untuk setiap umur dan hitung kekuatan rata-ratanya. Jika rentang kekuatan lentur dari dua spesimen melebihi 15 % dari kekuatan rata-ratanya, uji balok lain dan hitung kekuatan rata-rata dari tiga pengujian. Jika hasil uji yang rendah diakibatkan cacat pada spesimen, abaikan hasil uji yang rendah tersebut. Gunakan prosedur yang sama seperti pada 8.5 dan 8.6 untuk mengembangkan hubungan kekuatan lentur - maturitas.



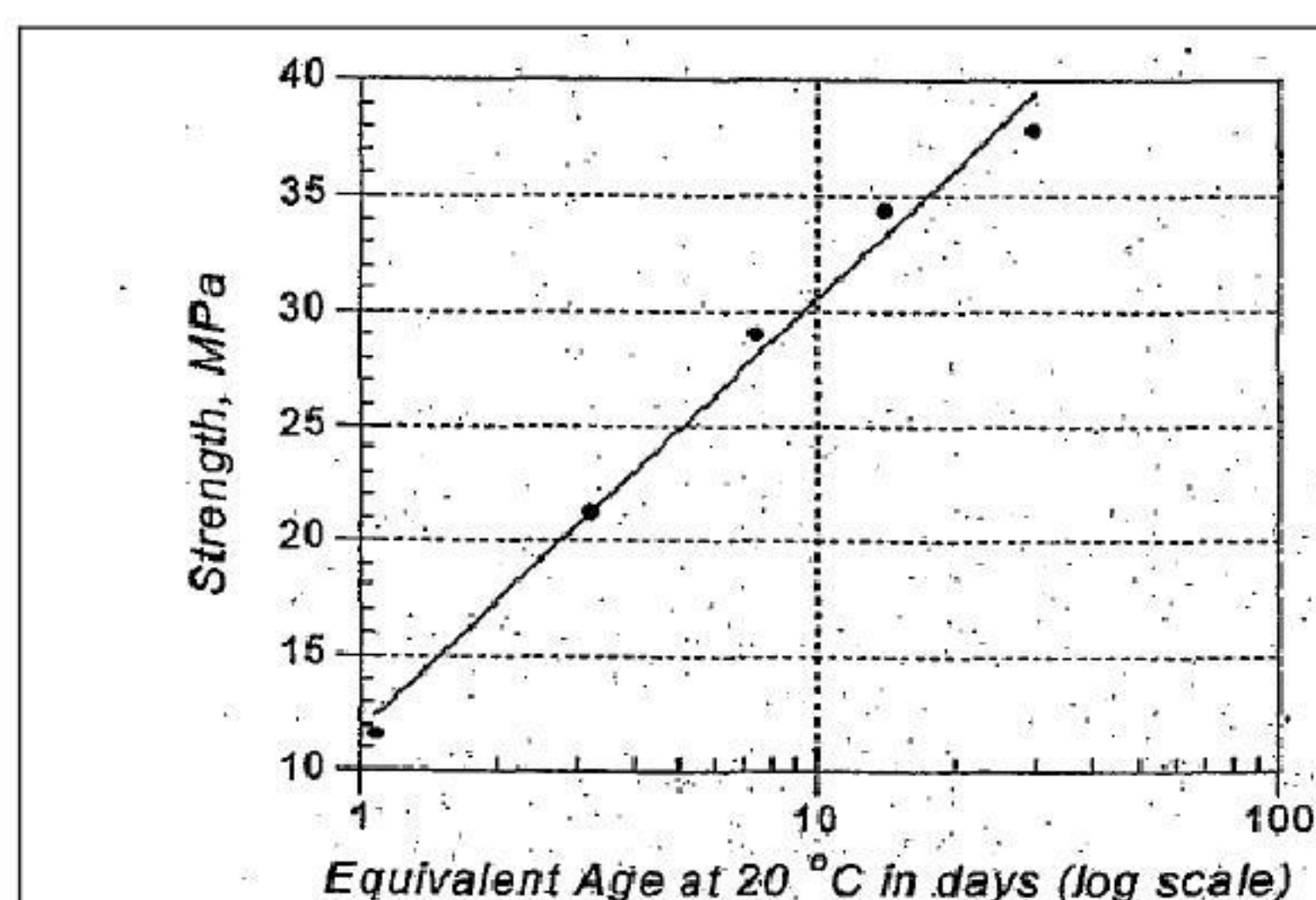
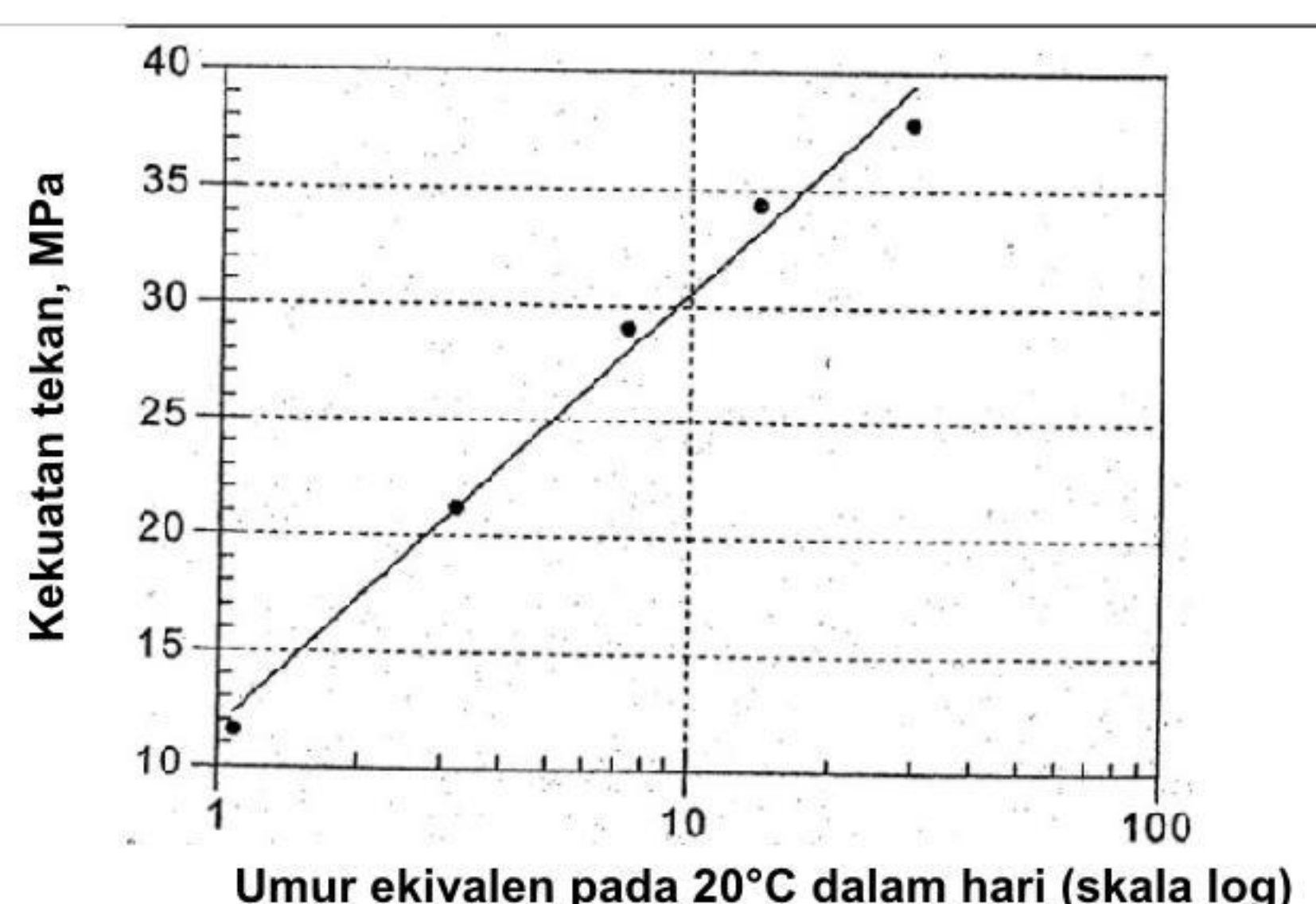


FIG. 3 Example of Compressive Strength as a Function of Logarithm of Equivalent Age



Gambar 3 Contoh kekuatan tekan sebagai fungsi dari logaritma umur ekivalen

**8.8** It is also permitted to develop a relationship between cube strength of concrete and the maturity index. Follow the procedure as given, for cylinders except that the cubes should be prepared and tested in accordance with the applicable test method. Insert temperature sensors at the centers of at least two cubes. Test two cubes at each test age. In deciding whether to discard a low cube strength result, use the precision statement of the standard test method for cube strength as guidance.

## 9. Procedure to Estimate In-Place Strength

**9.1** Secure temperature sensors within the section to be cast before concrete placement, or embed temperature sensors into the fresh concrete as soon as is practicable after concrete placement (see Note 7). Place temperature sensing elements so that they will be surrounded by concrete and not be in direct contact with metallic embedments or other features that will be partially exposed to the environment (see Note 8). If this practice is used to decide whether critical construction operations may begin, install sensors at locations in the structure that are critical in terms of exposure conditions and structural requirements (see Note 9).

**NOTE 7** – The appropriate method will depend on the type of sensor that is used and the conditions at the construction site. Manufacturer's recommendations provide additional guidance.

**NOTE 8** – The intent is to avoid placing

**8.8** Juga diizinkan untuk mengembangkan hubungan antara kekuatan kubus beton dan indeks maturitas. Ikuti prosedur seperti yang diberikan untuk silinder kecuali bahwa kubus harus disiapkan dan diuji sesuai dengan metode uji yang berlaku. Sisipkan sensor temperatur di pusat paling sedikit dua kubus. Uji dua kubus pada setiap umur uji. Untuk memutuskan apakah hasil uji kubus kekuatan rendah akan diabaikan, sebagai pedoman gunakan pernyataan presisi metode uji standar untuk kekuatan kubus.

## 9. Prosedur untuk mengestimasi kekuatan in-situ

**9.1** Amankan sensor temperatur dalam penampang yang akan dicor beton, atau tanam sensor temperatur ke dalam beton segar sesegera mungkin setelah beton dicor (lihat Catatan 7). Tempatkan elemen sensor temperatur sehingga mereka dikelilingi beton dan tidak bersentuhan langsung dengan logam yang tertanam atau fitur-fitur lain yang sebagian akan terekspos langsung terhadap kondisi lingkungan (lihat Catatan 8). Jika tata cara ini digunakan untuk menentukan apakah pelaksanaan konstruksi yang kritis sudah boleh dimulai, pasang sensor-sensor di lokasi-lokasi pada struktur yang kritis dari aspek kondisi lingkungan dan persyaratan struktural (lihat Catatan 9).

**CATATAN 7** – Metode yang tepat akan tergantung pada tipe sensor yang digunakan dan kondisi di lokasi konstruksi. Rekomendasi pabrik merupakan panduan tambahan.

**CATATAN 8** – Tujuannya adalah untuk



temperature sensing elements in contact With embedments that are partially exposed to the ambient environment and that could potentially be at a different temperature than the concrete.

**NOTE 9** – In building construction, exposed portions of slabs and slab-column connections are typically critical locations. The advice of the Engineer should be sought for critical locations in the particular structure under construction.

**9.2** Connect the sensors to maturity: instruments or temperature-recording devices and activate the recording devices as soon as is practicable. Use the same value of datum temperature or activation energy, whichever is applicable, as was used in computing the maturity index during development of the strength-maturity relationship (See Section 8).

**9.3** When the strength at the location of a sensor is to be estimated, read the value of the maturity index from the maturity instrument or evaluate the maturity index from the temperature record.

**9.4** Using the strength-maturity relationship developed in Section 8, read off the value of compressive (or flexural) strength corresponding to the measured maturity index.

**9.5** Before performing critical operations, such as formwork removal or post-tensioning, that are based on estimated strength from the concrete maturity, perform other tests to ensure that the concrete in the structure has a potential strength that is similar to that of the concrete used to develop the strength-maturity relationship. Appropriate techniques include:

**9.5.1** In-place tests that give indications of strength, such as Test Method C873/C873M, Test Method C803/C803M, or Test Method C900.

**NOTE 10** - The latter two test methods require mixture-specific strength relationships to estimate in-place strength.

menghindarkan penempatan elemen-elemen sensor temperatur bersentuhan dengan fitur-fitur lain yang sebagian terekspos lingkungan sekitar sehingga berpotensi berada pada temperatur yang berbeda dari temperatur beton.

**CATATAN 9** – Dalam pelaksanaan bangunan gedung, bagian slab dan sambungan slab-kolom yang terekspos biasanya merupakan lokasi yang kritis. Harus diminta pendapat dari Insinyur tentang lokasi-lokasi kritis pada struktur selama tahap pelaksanaan konstruksi.

**9.2** Hubungkan sensor ke instrumen maturitas atau peralatan pencatat-temperatur dan aktifkan alat pencatat sesegera mungkin. Gunakan nilai temperatur datum atau energi aktivasi yang sama, pilih yang sesuai, seperti yang digunakan dalam perhitungan indeks maturitas selama pengembangan hubungan kekuatan-maturitas (Lihat Pasal 8).

**9.3** Bila kekuatan pada lokasi sensor harus diestimasi, baca nilai indeks maturitas dari instrumen maturitas atau evaluasi indeks maturitas dari rekaman temperatur.

**9.4** Gunakan hubungan kekuatan-maturitas yang dikembangkan pada Pasal 8, baca nilai kekuatan tekan (atau kekuatan lentur) yang sesuai dengan indeks maturitas yang diukur.

**9.5** Sebelum melakukan pekerjaan yang kritis, misalnya pembongkaran perancah atau pasca-tarik kabel prategang, yang didasarkan pada kekuatan yang diestimasi dari maturitas beton, lakukan uji lain untuk memastikan bahwa beton struktur memiliki kekuatan potensial yang setingkat dengan beton yang digunakan untuk mengembangkan hubungan kekuatan-maturitas. Teknik yang sesuai mencakup:

**9.5.1** Pengujian in-situ untuk mengindikasikan kekuatan, misalnya ASTM C873/C873M, ASTM C803/C803M, atau ASTM C900.

**CATATAN 10** – Dua metode pengujian yang terakhir membutuhkan hubungan kekuatan campuran-khusus untuk mengestimasi kekuatan in-situ.



**9.5.2** Early-age compressive strength tests in accordance with Test Method C918/C918M of standard-cured specimens molded from samples of the concrete as-delivered.

**9.5.3** Compressive strength tests on specimens molded from samples of the concrete as-delivered and subjected to accelerated curing in accordance with Test Method C684.

**9.5.4** Early-age tests of field-molded cylinders instrumented with maturity instruments. These cylinders shall be subjected to standard curing in accordance with Practice C31/C31M. The early-age strengths are measured after the in-place maturity of the structure indicates that the concrete has attained the target strength on the basis of the strength-maturity relationship. The measured strengths are compared with the strengths estimated from the established strength-maturity relationship and the maturity index of the test cylinders. If the difference consistently exceeds 10 %, a new strength-maturity relationship is to be developed in accordance with Section 8.

## 10. Precision and Bias

**10.1** This practice is used to estimate the in-place strength of concrete based on the measured thermal history at a point in the structure and a previously established strength-maturity relationship. The accuracy of the estimated strength depends on several factors, such as the appropriateness of the maturity function for the specific mixture, the early-age temperature history, and the actual mixture proportions. For this reason, it is not possible to write statements about the precision and bias of the estimated strength.

## 11. Keywords

**11.1** in-place strength; maturity method; nondestructive testing; temperature

**9.5.2** Pengujian kekuatan tekan umur muda sesuai ASTM C918/C918M, spesimen dirawat standar yang dicetak dari sampel beton yang dikirim.

**9.5.3** Pengujian kekuatan tekan pada spesimen yang dicetak dari sampel beton yang dikirim dan mengalami perawatan dipercepat sesuai ASTM C684.

**9.5.4** Pengujian umur muda untuk silinder yang dicetak di lapangan dan dipasang instrumen instrumen maturitas. Silinder-silinder ini harus dirawat standar sesuai ASTM C31/C31M. Kekuatan umur-awal diukur setelah maturitas beton in-situ pada struktur mengindikasikan bahwa beton telah mencapai kekuatan yang ditargetkan berdasarkan hubungan kekuatan-maturitas. Kekuatan yang diukur dibandingkan dengan kekuatan yang diestimasi dari hubungan kekuatan-maturitas dan indeks maturitas dari silinder-silinder uji. Jika perbedaan secara konsisten lebih besar dari 10%, hubungan kekuatan-maturitas harus dikembangkan sesuai Pasal 8.

## 10. Presisi dan bias

**10.1** Tata cara ini digunakan untuk mengestimasi kekuatan beton in-situ berdasarkan riwayat termal yang diukur dititik tertentu pada struktur dan sebelumnya telah digunakan untuk menentukan hubungan kekuatan-maturitas. Akurasi kekuatan yang diestimasi tergantung pada beberapa faktor, misalnya kesesuaian persamaan maturitas untuk campuran tertentu, riwayat temperatur umur-muda, dan proporsi campuran aktual. Untuk alasan ini, tidak mungkin menuliskan pernyataan presisi dan bias dari kekuatan yang telah diestimasi.

## 11. Kata kunci

**11.1** kekuatan in-situ; metode maturitas; pengujian nondestruktif; temperatur



## Annex (Mandatory Information)

### A1. Determination of datum temperature or activation energy

#### A1.1 Procedure

**A1.1.1** The testing required to determine experimentally the datum temperature or the activation energy can be performed using mortar specimens, and the results are applicable to the concrete under investigation (5, 6, 7). The basic approach is to establish the compressive strength versus age relationships for mortar specimens cured in water baths maintained at three different temperatures. Two baths are at the maximum and minimum concrete temperatures expected for the in-place concrete during the period when strengths are to be estimated. The third bath temperature is midway between the extremes. Depending on the data analysis procedure that is used, the final setting times of the mortar at the three temperatures may also have to be measured.

**A1.1.2** Proportion a mortar mixture having a fine aggregate-to-cement ratio (by mass) that is the same as the coarse aggregate-to-cement ratio of the concrete mixture under investigation (6). The paste shall have the same water-cementitious materials ratio and the same amounts of admixtures that will be used in the concrete.

**A1.1.3** If the strength data will be analyzed using the reciprocal plotting procedure in A 1.1.7, final setting times must be measured. Prepare three mortar specimens using containers specified in Test Method C403/C403M. Carefully submerge each specimen into its corresponding temperature bath. Determine the time of final setting for each temperature in accordance with, Test Method C403/C403M. The specimens are removed from the water baths and excess

## Tambahan (Normatif)

### A1. Penentuan temperatur datum atau energi aktivasi

#### A1.1 Prosedur

**A1.1.1** Pengujian yang diperlukan untuk menentukan temperatur datum atau energi aktivasi secara eksperimental dapat dilakukan dengan menggunakan spesimen mortar, dan hasilnya berlaku untuk beton yang diselidiki (5, 6, 7). Pendekatan dasarnya adalah untuk menentukan hubungan kekuatan tekan versus umur untuk spesimen mortar yang dirawat dengan perendaman dalam air pada tiga temperatur yang berbeda. Dua perendaman dengan temperatur beton maksimum dan minimum yang diharapkan untuk beton in-situ (in-place) selama periode estimasi kekuatan. Temperatur perendaman ketiga adalah rata-rata antara maksimum dan minimum. Tergantung pada prosedur analisis data yang digunakan, waktu pengikatan akhir mortar pada tiga temperatur juga harus diukur.

**A1.1.2** Proporsi campuran mortar dengan rasio massa agregat halus-semen (berdasarkan massa) yang sama dengan rasio agregat kasar-semen dari campuran beton yang diinvestigasi (6). Pasta harus mempunyai rasio air-bahan sementisius dan kadar bahan tambahan campuran yang sama dengan yang akan digunakan dalam beton.

**A1.1.3** Jika data kekuatan akan dianalisis dengan menggunakan prosedur penggambaran timbal balik dalam A1.1.7, waktu pengikatan akhir harus diukur. Siapkan tiga spesimen mortar dengan menggunakan wadah sesuai ASTM C403/C403M. Hati-hati benamkan setiap spesimen untuk direndam dengan temperatur yang sesuai. Tentukan waktu pengikatan akhir untuk setiap temperatur sesuai ASTM C403/C403M. Spesimen



water is removed prior to making penetration measurements. If the data will be analyzed using the regression procedures in A1.1.8, it is not necessary to measure times of final setting.

**A1.1.4** Prepare three sets of 50-mm mortar cubes with 18 cubes per set. Mold the cubes in accordance with Test Method C109/C109M and carefully submerge each set into one of the temperature baths. For each set, remove the molds and return the specimens to their respective baths approximately 1 h before the first series of compression tests.

**A1.1.5** For each set of cubes, determine the compressive strength of three cubes in accordance with Test Method C109/C109M at an age that is approximately twice the time of final setting. If final setting times were not measured, perform the first test when the compressive strength is approximately 4 MPa. Perform subsequent tests on three cubes from each set at ages that are approximately twice the age of the previous tests. For example, if the time of the first test was 12 h, successive compressive strength tests would be performed at 1, 2, 4, 8, 16, and 32 days.

**A1.1.6** The strength versus age data obtained at the three curing temperatures are analyzed to determine the relationship between the rate constant for strength development (k-value) and the curing temperature. Different procedures can be used depending on the available computational tools. If the user has the capability to perform only linear regression analysis, use the procedure in A1.1.7 or A1.1.8.2. If the user has a computer program that can perform regression analyses with a general function, use the procedure in A1.1.8.1.

**A1.1.7** To use this procedure, the final setting times at the three temperatures must be measured. Prepare a graph with the reciprocal of strength as the y-axis and the reciprocal of age as the x-axis. For each curing temperature, plot the reciprocal of the average

dikeluarkan dari air perendam dan air yang berlebih dihilangkan sebelum dilakukan pengukuran penetrasi. Jika data akan dianalisis dengan menggunakan prosedur regresi pada A1.1.8, tidak perlu mengukur waktu pengikatan akhir.

**A1.1.4** Siapkan tiga set kubus mortar 50 mm, dengan 18 kubus per set. Cetak kubus sesuai ASTM C109/C109M dan hati-hati benamkan setiap set ke dalam masing-masing temperatur perendaman. Untuk setiap set, buka cetakan dan kembalikan spesimen ke perendamannya masing-masing kira-kira 1 jam sebelum seri pertama uji tekan.

**A1.1.5** Untuk setiap set kubus, tentukan kekuatan tekan tiga kubus sesuai ASTM C109/C109M pada umur kira-kira dua kali waktupengikatan akhir. Jika waktu pengikatan akhir tidak diukur, lakukan uji pertama ketika kekuatan tekan kira-kira 4 MPa. Lakukan uji berikutnya pada tiga kubus dari setiap set pada umur yang kira-kira dua kali dari umur uji sebelumnya. Misalnya, jika umur uji pertama adalah 12 jam, uji kekuatan tekan berikutnya harus dilakukan pada 1, 2, 4, 8, 16, dan 32 hari.

**A1.1.6** Data kekuatan versus umur yang diperoleh pada tiga temperatur perawatan dianalisis untuk menentukan hubungan antara konstanta kecepatan untuk perkembangan kekuatan (nilai-k) dan temperatur perawatan. Prosedur yang berbeda dapat digunakan tergantung dari alat komputasi yang tersedia. Jika pengguna memiliki kemampuan hanya untuk melakukan analisis regresi linier, gunakan Prosedur sesuai A1.1.7 atau A1.1.8.2. Jika pengguna memiliki program komputer yang dapat melakukan analisis regresi dengan fungsi umum, gunakan prosedur sesuai A1.1.8.1.

**A1.1.7** Untuk menggunakan prosedur ini, harus diukur waktu pengikatan akhir pada tiga temperatur. Siapkan grafik dengan 1/kekuatan sebagai sumbu y dan 1/umur sebagai sumbu x. Untuk setiap temperatur perawatan, gambarkan 1/kekuatan kubus



cube strength along the y-axis and the reciprocal of the age beyond the time of final setting along the x-axis. An example of such a plot is shown in Fig. A1.1. Determine the slope and the intercept of the best-fitting straight line through the data for each curing temperature. For each straight-line, divide the value of the intercept by the value of the slope. These quotients are the *k*-values that are used to calculate the datum temperature or the, activation energy.

**A1.1.8** As an alternative, to the procedure in A1.1.7, the *k*-values can be estimated by either of the following methods. In these cases, the final setting times do not have to be measured.

**A1.1.8.1** If the user has access to a computer program that will pennit the fitting of a general equation to a set of data, determine the *k*-values by fitting the following equation to the strength-age data for each curing temperature:

$$S = S_u \frac{k(t - t_o)}{1 + k(t - t_o)} \quad (\text{A1.1})$$

where:

*S* = average cube compressive strength at age *t*,  
*t* = test age,  
*S<sub>u</sub>* = limiting strength,  
*t<sub>o</sub>* = age when strength development is assumed to begin, and  
*k* = the rate constant.

The computer program will calculate the best-fit values of *S<sub>u</sub>*, *t<sub>o</sub>*, and *k*.

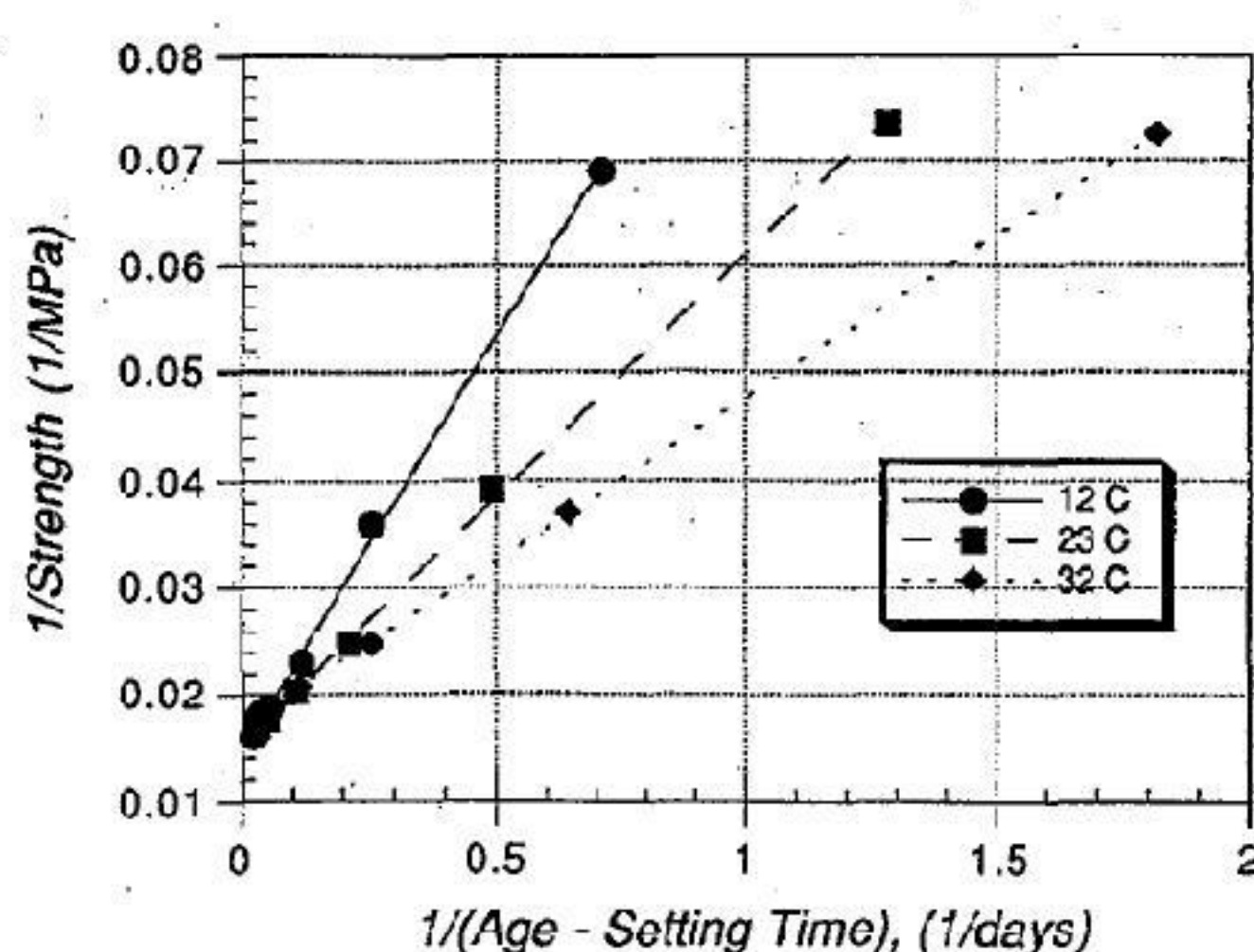


FIG. A1.1 Reciprocal of Strength Versus Reciprocal of Age Beyond Time of Final Setting

rata-rata sepanjang sumbu y dan 1/umur di luar waktu pengikatan akhir sepanjang sumbu-x. Sebagai contoh lihat Gambar A1.1. Tentukan kemiringan dan titik potong dari garis lurus terbaik melalui melalui data untuk setiap temperatur perawatan. Untuk setiap garis lurus, bagi nilai pada titik potong dengan nilai kemiringannya. Quotient ini adalah nilai-*k* yang digunakan untuk menghitung temperatur datum atau energi aktivasi.

**A1.1.8** Sebagai alternatif dari prosedur pada A1.1.7, nilai-*k* dapat diestimasi dengan salah satu dari metode berikut. Pada kasus ini, waktu pengikatan akhir tidak harus diukur.

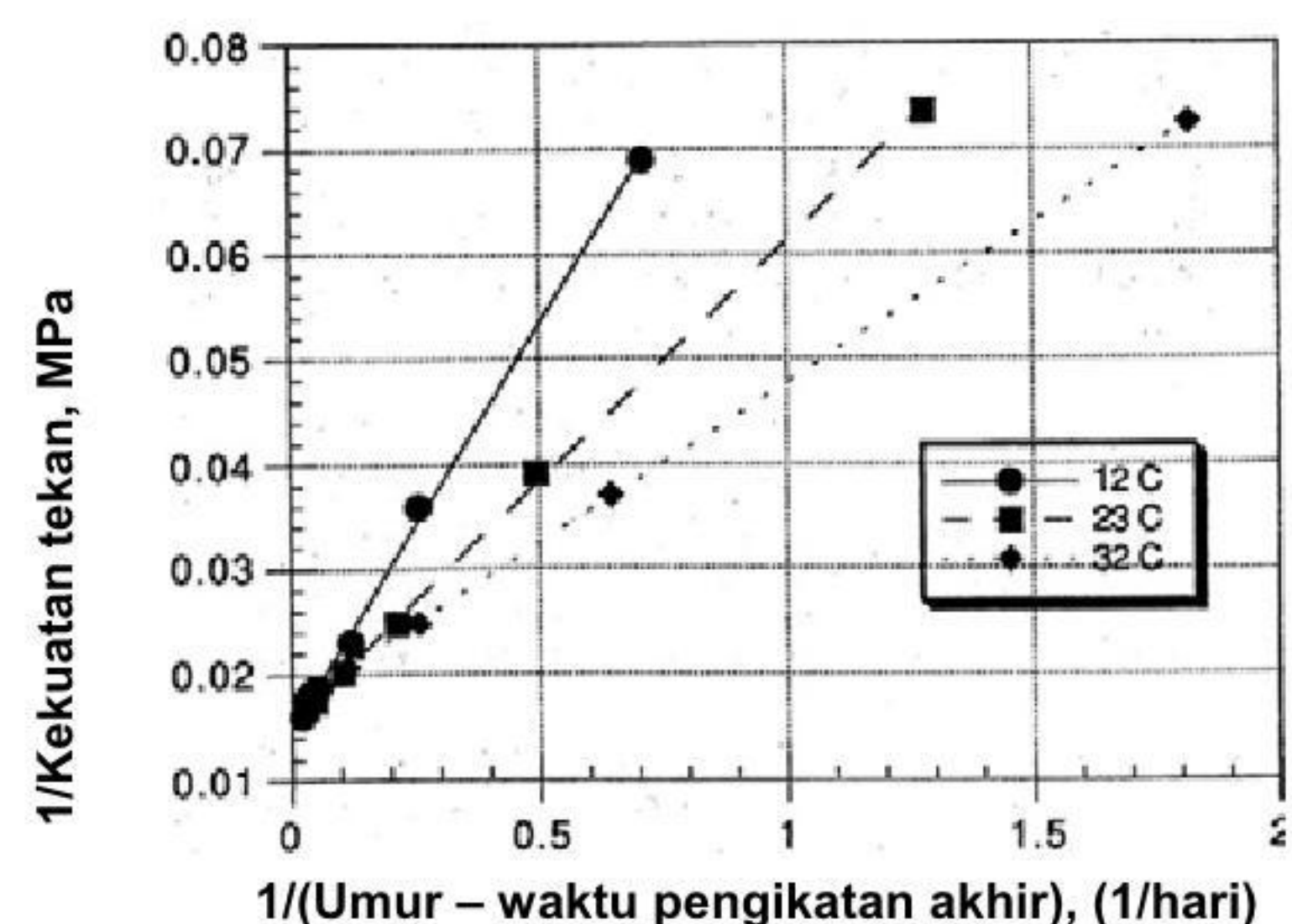
**A1.1.8.1** Jika pengguna memiliki akses pada program komputer yang dapat digunakan untuk menghasilkan persamaan umum dari satu set data, tentukan nilai-*k* dengan persamaan berikut pada data kekuatan-umur untuk setiap temperatur perawatan:

$$S = S_u \frac{k(t - t_o)}{1 + k(t - t_o)} \quad (\text{A.1.1})$$

keterangan:

*S* = kekuatan tekan kubus rata-rata pada umur *t*,  
*t* = umur uji,  
*S<sub>u</sub>* = kekuatan batas  
*t<sub>o</sub>* = umur ketika perkembangan kekuatan diasumsikan dimulai, dan  
*k* = laju konstanta.

Program komputer akan menghitung nilai-nilai yang paling cocok untuk *S<sub>u</sub>*, *t<sub>o</sub>* dan *k*.



Gambar A1.1 Satu perkekuatan versus satu per umur setelah waktu pengikatan akhir



**A1.1.8.2** The k-values can also be estimated by the following method (5, 8).

(1) Using the strength-age data for the last four test ages, plot the reciprocal of strength (y-axis) versus the reciprocal of age (x-axis). Determine the y-axis intercept. The inverse of the intercept is the limiting strength,  $S_u$ . Repeat this procedure for each curing temperature.

(2) For each curing temperature, use the strength-age data at the four earliest test ages and the value of  $S_u$  to compute the values of  $A$  for each strength, where  $A$  is given by the following equation:

$$A = \frac{S}{(S_u - S)} \quad (A1.2)$$

(3) For each curing temperature, plot the values of  $A$  versus age. Determine the slopes of the best-fit straight lines for each curing temperature. These slopes are the k-values.

## A1.2 Determination of Datum Temperature

**A1.2.1** Plot the k-values as a function of the water bath temperatures (Fig. A1.2). Determine the best-fitting straight line through the three points and determine the intercept of the line with the temperature axis. This intercept is the datum temperature,  $T_0$ , that is to be used in computing the temperature-time factor according to Eq 1.

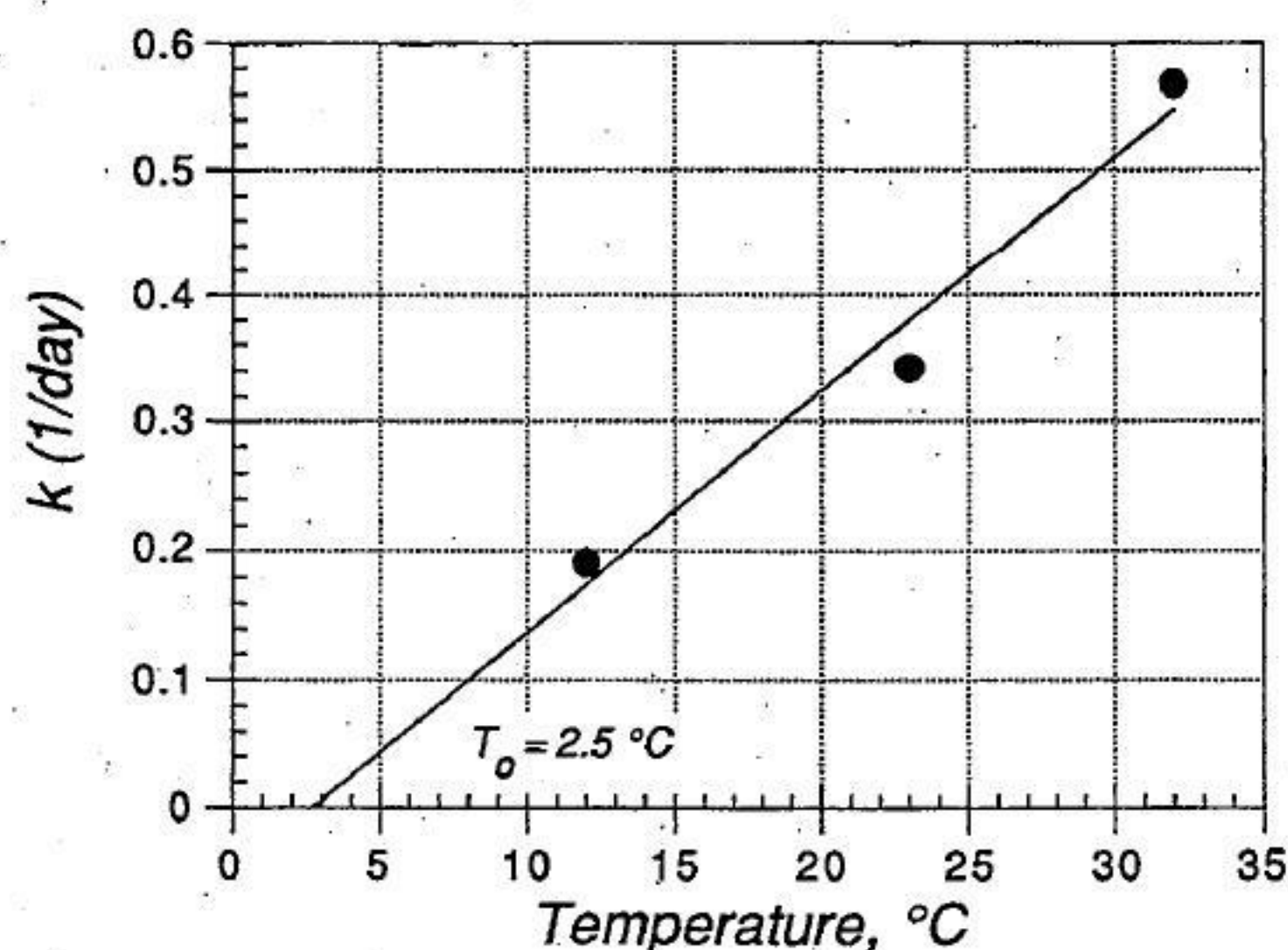


FIG. A1.2 Example of Plot of k-Values Versus Curing Temperature for Determining the Datum Temperature

**A1.1.8.2** Nilai k juga dapat diestimasi dengan metode berikut (5, 8).

(1) Menggunakan data kekuatan-umur untuk empat umur uji terakhir, plot 1/kekuatan (sumbu y) versus 1/umur (sumbu x). Tentukan titik potong sumbu y. Kebalikan dari perpotongan adalah kekuatan batas,  $S_u$ . Ulangi prosedur ini untuk setiap temperatur perawatan.

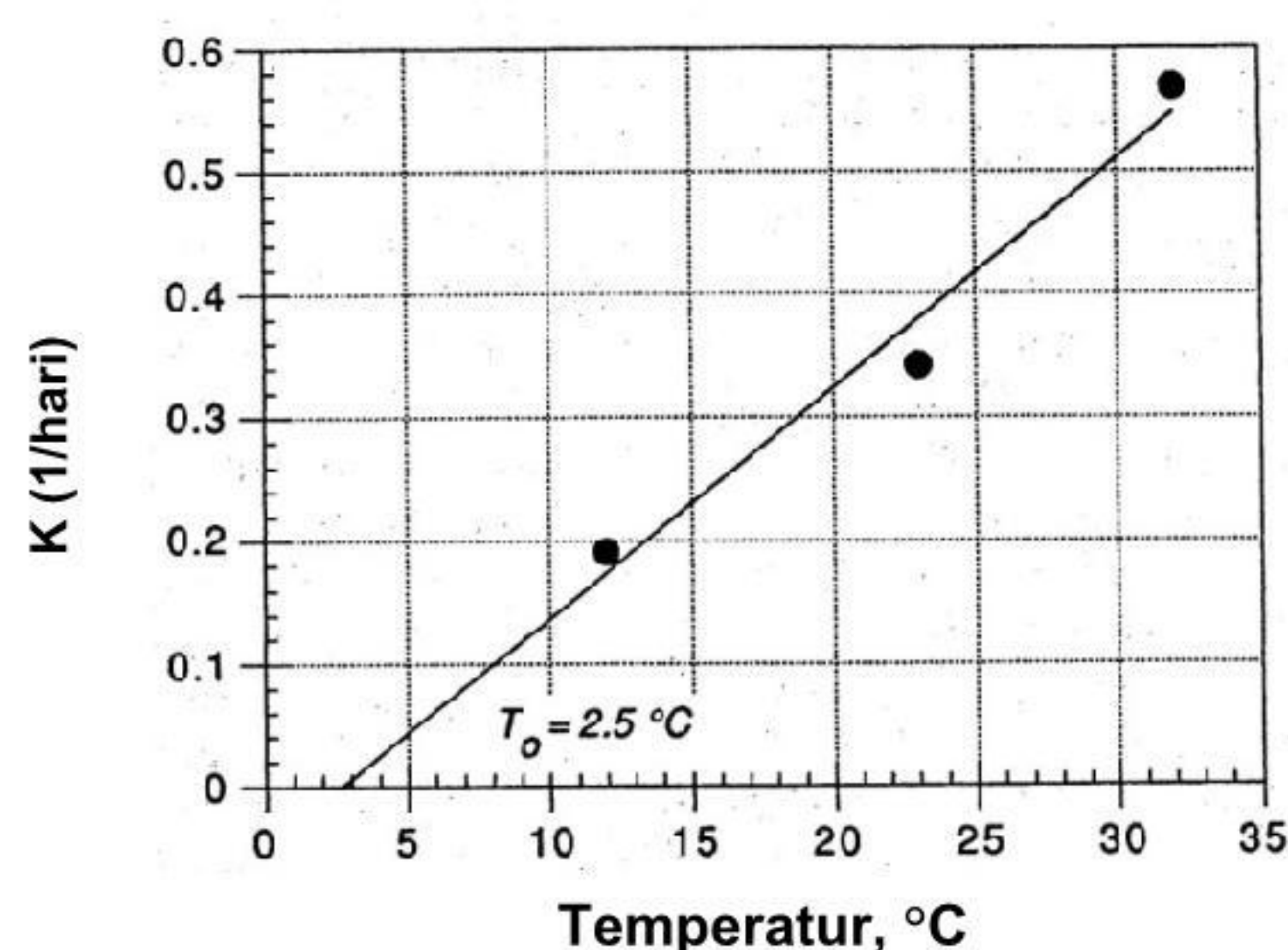
(2) Untuk setiap temperatur perawatan, gunakan data kekuatan-umur pada empat umur uji termuda dan nilai  $S_u$  untuk menghitung nilai  $A$  untuk setiap kekuatan, apabila  $A$  dihitung dari persamaan berikut:

$$A = \frac{S}{(S_u - S)} \quad (A1.2)$$

(3) Untuk setiap temperatur perawatan, plot nilai  $A$  versus umur. Tentukan kemiringan garis lurus terbaik untuk setiap temperatur perawatan. Kemiringan ini adalah nilai k.

## A1.2 Penentuan temperatur datum

**A1.2.1** Plot nilai k sebagai fungsi dari temperatur air perendam (Gambar A1.2). Tentukan garis lurus terbaik melalui tiga titik dan tentukan titik potongnya dengan sumbu temperatur. Titik potong ini adalah temperatur datum,  $T_0$ , yang harus digunakan dalam menghitung faktor temperatur-waktu sesuai Persamaan 1.



Gambar A1. 2 Contoh penggambaran nilai-nilai k versus temperatur perawatan untuk menentukan temperatur datum



**A1.3 Determination of Activation Energy**

**A1.3.1** Calculate the natural logarithms of the k-values, and determine the absolute temperatures (in kelvin) of the water baths (kelvin = Celsius + 273)

**A1.3.2** Plot the natural logarithm of the k-values as a function of the reciprocal absolute temperature (Fig. A1.3). Determine the best-fitting straight line through the three points. The negative of the slope of the line is the value of the activation energy divided by the gas constant, Q, that is to be used in computing equivalent age according to Eq 2.

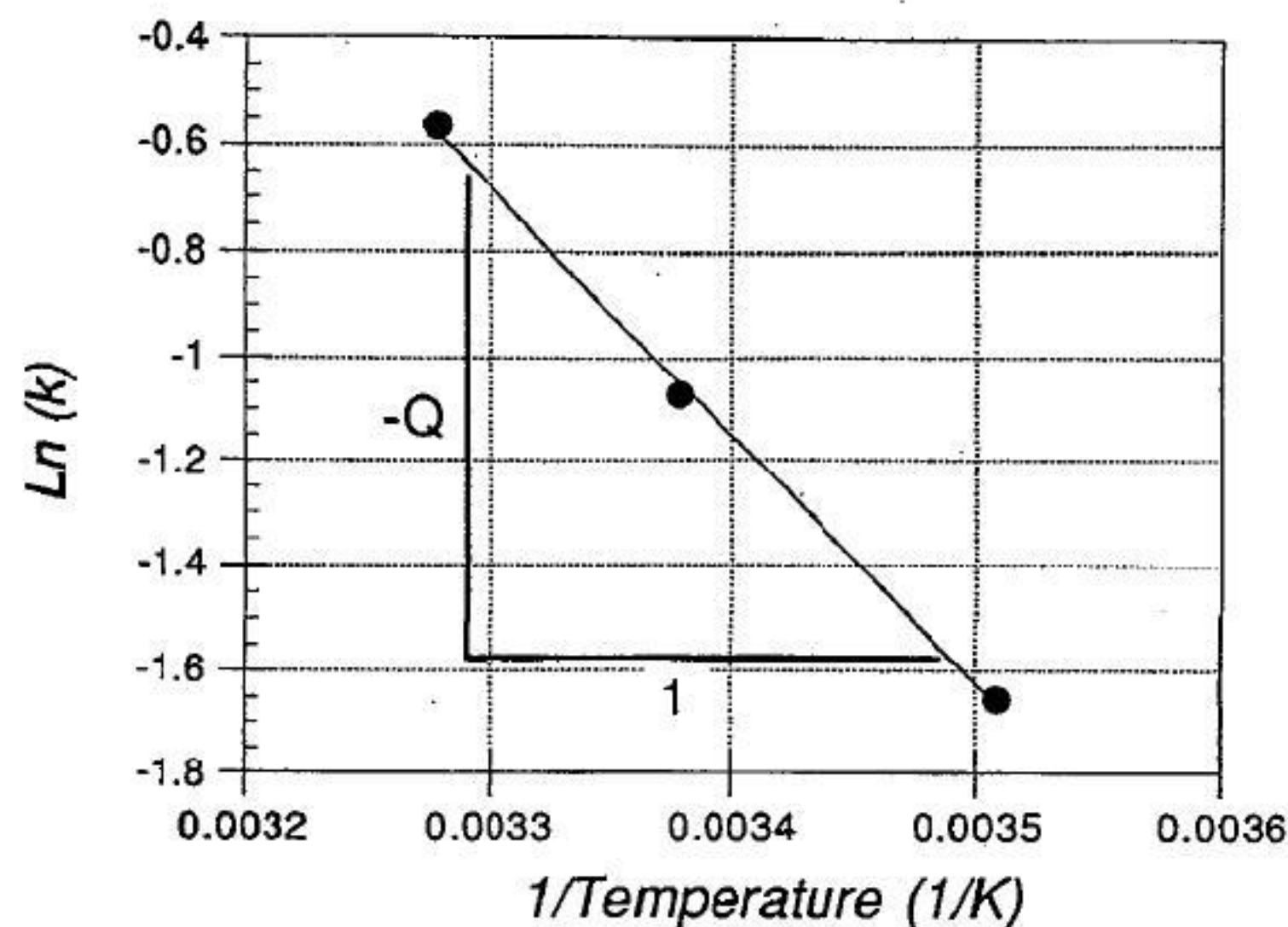
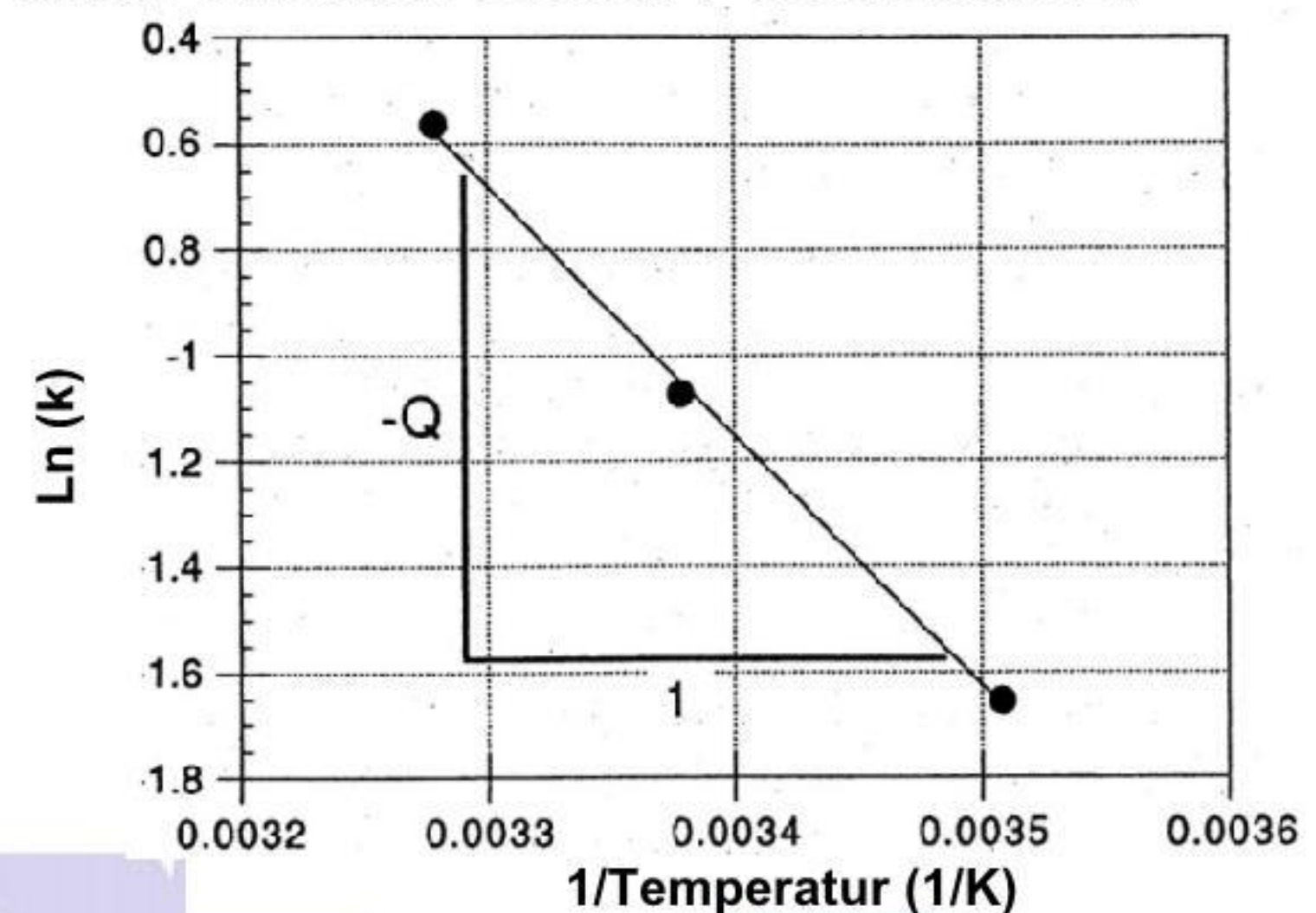


FIG. A1.3 Example of Plot of the Natural Logarithm of K-Values Versus the Inverse Absolute Temperature for Determining the Value of Q used in Calculating Equivalent Age

**A1.3 Penentuan energi pengaktifan**

**A1.3.1** Hitung logaritma natural nilai k (yaitu  $\ln k$ ), dan tentukan temperatur absolut (dalam Kelvin) dari air perendam (Kelvin = Celsius + 273)

**A1.3.2** Plot logaritma natural nilai k sebagai fungsi dari kebalikan temperatur absolut (Gambar A1.3). Tentukan garis lurus terbaik melalui tiga titik. Negatif dari kemiringan garis ini adalah nilai dari energi aktivasi dibagi dengan konstanta gas, Q, yang harus digunakan dalam menghitung umur ekuivalen sesuai Persamaan 2.



Gambar A1.3 Contoh penggambaran  $\ln (K)$  versus  $1/\text{Temperatur mutlak}$  untuk menentukan nilai Q yang digunakan pada perhitungan umur ekuivalen



## Appendixes (Nonmandatory Information)

### XI. MATURITY FUNCTIONS

#### X1.1 General

**X1.1.1** A maturity function is a mathematical expression to account for the combined effects of time and temperature on the strength development of a cementitious mixture. The key feature of a maturity function is the representation of how temperature affects the rate of strength development. There are two widely-used approaches; one assumes that the rate of strength development is a linear function of temperature, and the other assumes that rate of strength development obeys the exponential Arrhenius equation (3, 4, 5).

#### X1.2 Temperature-Time Factor

**X1.2.1** The assumption that the rate of strength development is a linear function of temperature leads to the maturity function given in Eq 1, which is used to compute the temperature-time factor. To compute the temperature-time factor, it is necessary to know the appropriate value of the datum temperature for the specific materials and conditions. The datum temperature may depend on the type of cement, on the type and the dosage of admixtures or other additives that affect hydration rate, and on the temperature range that the concrete will experience while hardening (5, 7): For Type I cement without admixtures and a curing temperature range from 0 to 40°C, the recommended datum temperature is 0 °C (5). For other conditions and when maximum accuracy of strength estimation is desired, the appropriate datum temperature can be determined experimentally according to the procedures in Annex A1.

**X1.2.2** Some types of maturity instruments that compute temperature-time factor may not employ the appropriate datum temperature,

## Lampiran (Informatif)

### X1. Persamaan maturitas

#### X1.1 Umum

**X1.1.1** Persamaan maturitas adalah sebuah persamaan matematis untuk menghitung efek kombinasi dari waktu dan temperatur pada perkembangan kekuatan suatu campuran sementisius. Fitur kunci dari persamaan maturitas adalah representasi tentang bagaimana temperatur mempengaruhi laju perkembangan kekuatan. Ada dua pendekatan yang digunakan secara luas; yang pertama mengasumsikan bahwa laju perkembangan kekuatan merupakan fungsi linier dari temperatur, dan yang lain mengasumsikan bahwa laju perkembangan kekuatan mengikuti persamaan eksponensial Arrhenius (3, 4, 5).

#### X1.2 Faktor temperatur-waktu

**X1.2.1** Asumsi bahwa laju perkembangan kekuatan merupakan fungsi linier dari temperatur mengarah ke Persamaan maturitas sesuai Persamaan 1, yang digunakan untuk menghitung faktor temperatur-waktu. Untuk menghitung faktor temperatur-waktu, maka perlu diketahui nilai temperatur datum yang sesuai untuk material tersebut dan kondisi yang spesifik. Temperatur datum dapat tergantung pada tipe semen, pada tipe dan dosis bahan tambahan campuran atau aditif lain yang mempengaruhi laju hidrasi, dan pada rentang temperatur yang akan dialami beton selama proses pengerasan (5, 7). Untuk semen tipe I tanpa aditif dan rentang temperatur perawatan dari 0 sampai 40 °C, temperatur datum yang direkomendasikan adalah 0 °C (5). Untuk kondisi lain dan biladiinginkan akurasi maksimum pada estimasi kekuatan, temperatur datum yang sesuai dapat ditentukan secara eksperimental sesuai prosedur lampiran A1.

**X1.2.2** Beberapa tipe instrumen maturitas yang menghitung faktor temperatur-waktu



and therefore may not indicate the true value of the factor. The value of the temperature-time factor displayed by the instrument can be corrected for the datum temperature as follows:

$$M_c = M_d - (T_o - T_d) t \quad (X1.1)$$

where:

$M_c$  = the corrected temperature-time factor, degree-days or degree-hours,

$M_d$  = the temperature-time factor displayed by the instrument, degree-days or degree-h,

$T_o$  = the appropriate datum temperature for the concrete, °C,

$T_d$  = the datum temperature incorporated into the instrument, °C, and

$t$  = the elapsed time from when the instrument was turned on to when a reading was taken, days or h.

### X1.3 Equivalent Age

**X1.3.1** The assumption that the rate of strength development obeys the Arrhenius equation leads to the maturity function given in Eq 2, which is used to compute equivalent age at a specified temperature. Note that in using Eq 2, the temperature must be in kelvin (kelvin = Celsius + 273). To compute equivalent age it is necessary to know the activation energy for the specific materials and conditions. It has been shown that the activation energy depends on the type of cement, the type and the dosage of admixtures that affect the rate of strength development, and the water-cementitious materials ratio (7). In general, for Type I cement without admixtures or additions, values of activation energy in the range of 40 000 to 45 000 J/mol have been reported (6). Thus an approximate value of  $Q$ , the activation energy divided by the gas constant for use in Eq 2, is 5000 K. (The value of the gas constant is 8.31 J/(K-mol)). For other conditions and when maximum accuracy of strength estimation is desired, the appropriate value for  $Q$  can be determined experimentally according to the procedures in Annex A1.

mungkin tidak menggunakan temperatur datum yang tepat, dan akibatnya tidak dapat mengindikasikan nilai faktor yang benar. Nilai dari faktor temperatur-waktu yang didisplay pada instrumen dapat dikoreksi untuk temperatur datum berikut:

$$M_c = M_d - (T_o - T_d) t \quad (X1.1)$$

keterangan:

$M_c$  = faktor temperatur-waktu terkoreksi, derajat-hari atau derajat-jam,

$M_d$  = faktor temperatur-waktu yang didisplay oleh instrumen, derajat-hari atau derajat-jam,

$T_o$  = temperatur datum yang sesuai untuk beton, °C,

$T_d$  = temperatur datum yang terhubung pada instrumen, °C, dan

$t$  = selisih waktu ketika instrumen dihidupkan dengan ketika pembacaan dilakukan, hari atau jam.

### X1.3 Umur ekivalen

**X1.3.1** Asumsi bahwa laju perkembangan kekuatan mengikuti persamaan Arrhenius menghasilkan persamaan maturitas sesuai Persamaan 2, yang digunakan untuk menghitung umurekivalen pada temperatur tertentu. Perhatikan bahwa dalam menggunakan Persamaan 2, temperatur harus dalam kelvin (kelvin = Celcius + 273). Untuk menghitung umur ekivalen perlu diketahui energi aktivasi untuk material spesifik dan kondisinya. Telah ditunjukkan bahwa energi aktivasi tergantung pada tipe semen, tipe dan dosis bahan tambahan campuran yang mempengaruhi laju perkembangan kekuatan, dan rasio air-bahan sementisius (7). Pada umumnya, untuk semen tipe I tanpa bahan tambahan campuran atau aditif, nilai-nilai energi aktivasi dalam rentang 40 000 sampai 45 000 J/mol telah dilaporkan (6). Sehingga nilai pendekatan  $Q$ , energi aktivasi dibagi dengan konstanta gas untuk digunakan dalam Persamaan 2, adalah 5000 K. (Nilai dari konstanta gas adalah 8,31 J/K-mol). Untuk kondisi lain dan bila diinginkan akurasi maksimum dari estimasi kekuatan, nilai yang sesuai untuk  $Q$  dapat ditentukan secara eksperimental sesuai prosedur lampiran A1.



**X1.3.2** The calculation of equivalent age also requires a specified temperature,  $T_s$ . Traditionally, a value of 20 °C has been used (4), but any other convenient temperature, such as 23 °C, is permissible provided that it is reported along with the value of the equivalent age.

**X1.3.3** Maturity instruments that compute equivalent age according to Eq 2, are based on specific values of activation energy. The displayed readings cannot be corrected for the appropriate activation energy value of the concrete being used.

The user should recognize this limitation when the in-place concrete has an activation energy that is widely different from that incorporated into the instrument.

Refer to (3) for information on the effect of the activation energy on the computed value of equivalent age.

## X2.1 Temperature Record

**X2.1.1** Fig. X2.1 shows a hypothetical temperature history for concrete that will be used to illustrate the calculations of temperature-time factor and equivalent age. The temperature values at half-hour intervals are tabulated in column 2 of Table X2.1.

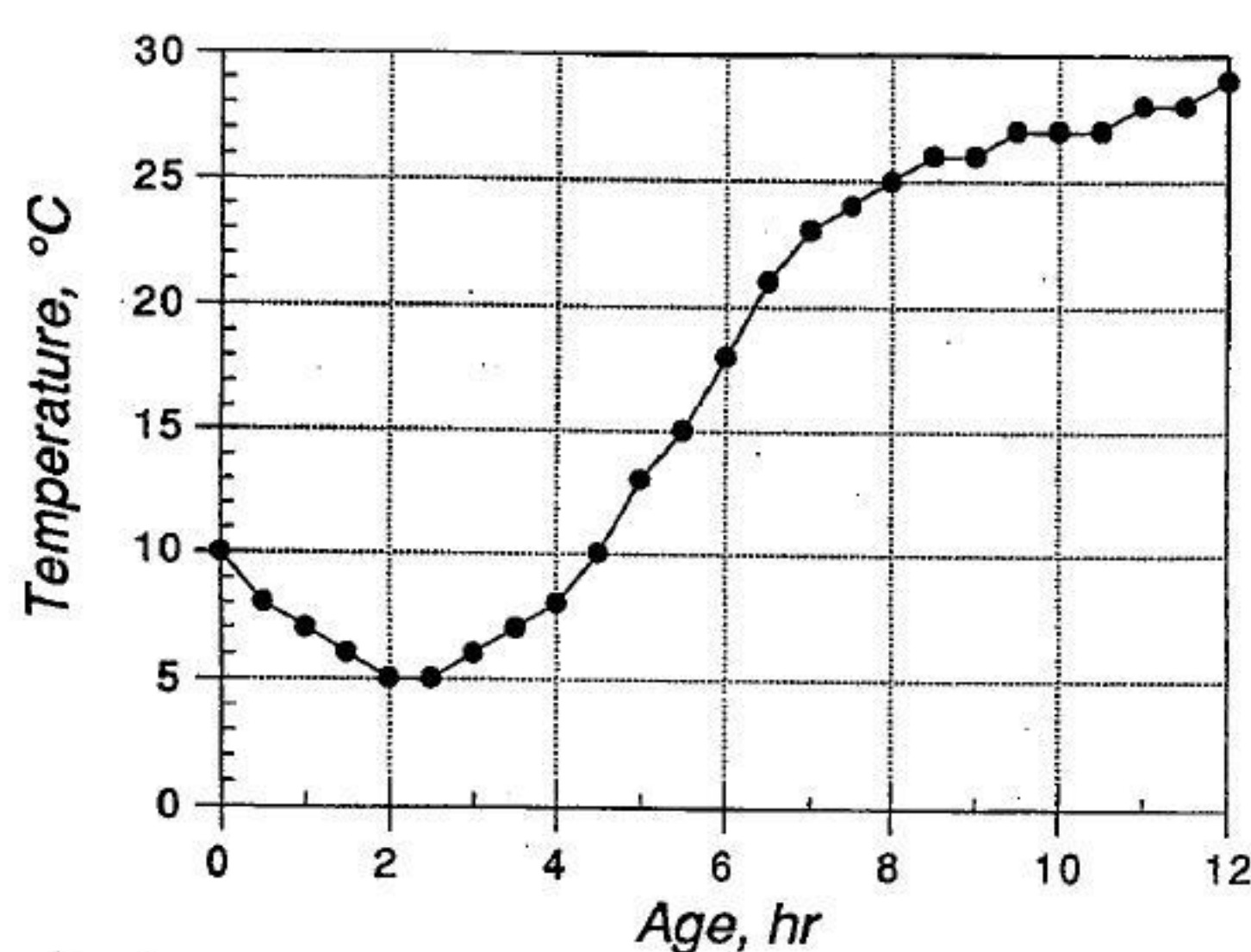


FIG. X2.1 Hypothetical Temperature History used to Illustrate Computations of Temperature-Time Factor and Equivalent Age

## X2.2 Calculation of Temperature-time Factor

**X2.2.1** The value of the datum temperature,  $T_o$ , is required to compute the temperature-time factor according to Eq 1. For this example, a value of 2.5 °C is assumed as

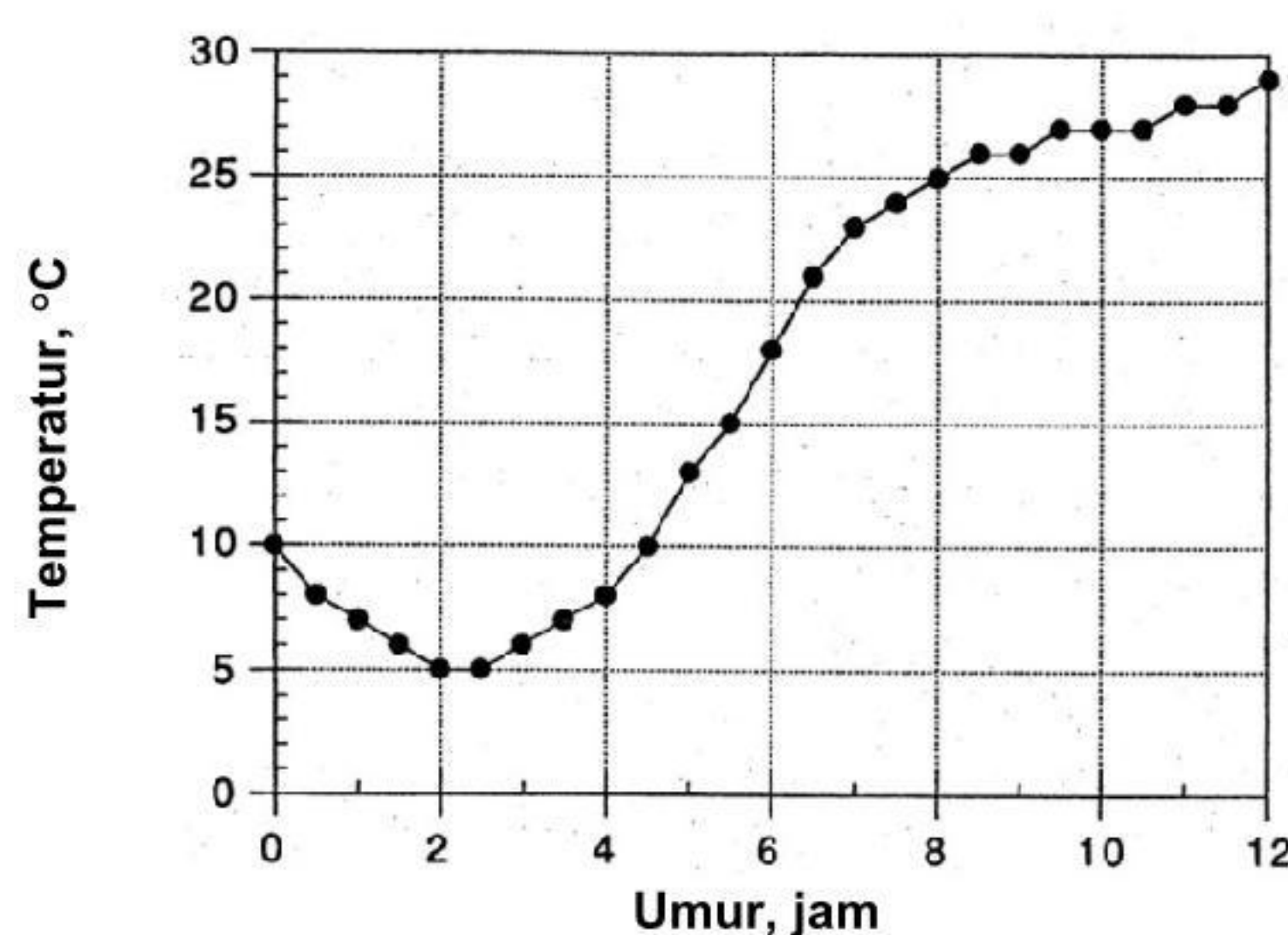
**X1.3.2** Perhitungan umur ekivalen juga memerlukan temperatur tertentu,  $T_s$ . Secara tradisional, nilai 20 °C telah digunakan (4), tetapi setiap temperatur yang sesuai lainnya, seperti 23 °C, diperbolehkan asalkan itu dilaporkan bersama dengan nilai umur ekivalen.

**X1.3.3** Instrumen maturity yang menghitung umur ekivalen sesuai Persamaan 2, didasarkan pada nilai-nilai tertentu energi aktivasi. Pembacaan yang didisplay tidak dapat dikoreksi untuk nilai energi aktivasi yang sesuai dari beton yang bersangkutan. Pengguna harus mengenali keterbatasan ini bila beton in-situ memiliki energi aktivasi yang berbeda jauh dari yang dihubungkan ke instrumen.

Lihat (3) untuk informasi tentang efek dari energi aktivasi pada nilai umur ekivalen hasil hitungan.

## X2.1 Catatan temperatur

**X2.1.1** Gambar X2.1 menunjukkan riwayat temperatur hipotetis untuk beton yang akan digunakan sebagai ilustrasi perhitungan faktor temperatur-waktu dan umur ekivalen. Nilai temperatur pada interval setengah jam ditabelkan pada kolom 2 Tabel X2.1.



Gambar X2.1 Riwayat temperatur Hipotetis yang digunakan untuk ilustrasi perhitungan faktor temperatur-waktu dan umur ekivalen

## X2.2 Perhitungan faktor temperatur-waktu

**X2.2.1** Nilai temperatur datum,  $T_o$ , diperlukan untuk menghitung faktor temperatur-waktu sesuai Persamaan 1.



indicated in Fig. A1.2.

**X2.2.2** The average temperature during each half-hour interval is computed and the results are given in column 4 of Table X2.1. The datum temperature is subtracted from the average temperature, and the difference is multiplied by the age interval, which in this example is 0.5 h. The product gives the incremental value of the temperature-time factor for that age interval. The incremental values are shown in column 5 of Table X2.1.

**X2.2.3** The summation of the incremental temperature-time factors gives the cumulative temperature-time factor at each age. For example, at an age of 12 h the temperature-time factor is 175°C-h.

### X2.3 Calculation of Equivalent Age

**X2.3.1** The value of  $Q$  and the value of the specified temperature,  $T_s$  are required to compute the equivalent age according to Eq 2. For this example, the value of  $Q$  is assumed to be 4700 K, and the specified temperature is assumed to be 20°C (293 K).

**X2.3.2** Using the average temperature, in kelvin, during each age interval, the values of the exponential function in Eq 2 are calculated. These values are given in column 7 of Table X2.1 under the heading Age Factor. The product of each of the age factors and the age interval (0.5 h) gives the incremental equivalent ages at 20°C; the incremental equivalent ages are shown in column 8 of Table X2.1.

**X2.3.3** The summation of the incremental equivalent ages gives the cumulative equivalent age at 20°C (column 9 of Table X2.1). For example, at an age of 12 h the equivalent age at 20°C is 11.3 h. Note that because the concrete temperature is less than 20°C for the first six hours, the equivalent age at 6 h is only 3.2 h.

Untuk contoh ini, nilai 2,5 °C diasumsikan seperti pada Gambar A1.2.

**X2.2.2** Dihitung temperatur rata-rata selama setiap interval setengah jam dan hasilnya diberikan pada kolom 4 Tabel X2.1. Temperatur datum dikurangi dari temperatur rata-rata, dan selisihnya dikalikan dengan interval umur, yang dalam contoh ini adalah 0,5 jam. Hasil kalinya memberikan pertambahan nilai faktor temperatur-waktu untuk setiap interval umur. Pertambahan nilai dicantumkan dalam kolom 5 Tabel X2.1

**X2.2.3** Penjumlahan pertambahan faktor temperatur-waktu memberikan faktor temperatur-waktu kumulatif pada setiap umur. Misalnya, pada umur 12 jam faktor temperatur-waktu adalah 175°C-jam.

### X2.3 Perhitungan umur ekuivalen

**X2.3.1** Nilai  $Q$  dan nilai temperatur tertentu,  $T_s$ , diperlukan untuk menghitung umur ekuivalen sesuai Persamaan 2. Untuk contoh ini, nilai  $Q$  diasumsikan 4700 °K, dan temperatur yang disyaratkan diasumsikan 20 °C (293 K).

**X2.3.2** Selama setiap interval umur, hitung nilai-nilai fungsi eksponensial sesuai Persamaan 2 dengan menggunakan temperatur rata-rata, dalam kelvin. Nilai-nilai ini dicantumkan dalam kolom 7 Tabel X2.1 di kolom Faktor Umur. Hasil kali dari setiap faktor umur dan interval umur (0,5 jam) memberi umur ekuivalen tambahan pada 20 °C; umur ekuivalen tambahan ditunjukkan pada kolom 8 Tabel X2.1.

**X2.3.3** Penjumlahan dari pertambahan umur ekuivalen menyajikan umur ekuivalen kumulatif pada 20 °C (kolom 9 dari Tabel X2.1). Misalnya, pada umur 12 jam umur ekuivalen pada 20 °C adalah 11,3 jam. Catat bahwa karena temperatur beton kurang dari 20 °C untuk enam jam pertama, umur ekuivalen pada 6 jam hanya 3,2 jam.



Tabel X2. 1 Contoh perhitungan maturitas

(1) Umur, Jam	(2) Temperatur, °C	(3) Kenaikan Umur, jam	(4) Temperatur Rata-rata, °C	(5) Faktor Temperatur- Waktu, Kenaikan °C-jam	(6) Faktor Temperatur- Waktu, Kumulatif °C-jam	(7) Faktor umur	(8) Umur Persamaan pada 20 °C, Kenaikan jam	(9) Umur Persamaan pada 20 °C, Kumulatif
0	10	...	...	...	0	...	...	0,0
0,5	8	0,5	9	3,3	3	0,53	0,27	0,3
1,0	7	0,5	7,5	2,5	6	0,49	0,24	0,5
1,5	6	0,5	6,5	2,0	8	0,46	0,23	0,7
2,0	5	0,5	5,5	1,5	9	0,43	0,22	1,0
2,5	5	0,5	5	1,3	11	0,42	0,21	1,2
3,0	6	0,5	5,5	1,5	12	0,43	0,22	1,4
3,5	7	0,5	6,5	2,0	14	0,46	0,23	1,6
4,0	8	0,5	7,5	2,5	17	0,49	0,24	1,9
4,5	10	0,5	9	3,3	20	0,53	0,27	2,1
5,0	13	0,5	11,5	4,5	24	0,62	0,31	2,4
5,5	15	0,5	14	5,8	30	0,72	0,36	2,8
6,0	18	0,5	16,5	7,0	37	0,82	0,41	3,2
6,5	21	0,5	19,5	8,5	46	0,97	0,49	3,7
7,0	23	0,5	22	9,8	55	1,11	0,56	4,3
7,5	24	0,5	23,5	10,5	66	1,21	0,60	4,9
8,0	25	0,5	24,5	11,0	77	1,27	0,64	5,5
8,5	26	0,5	25,5	11,5	88	1,34	0,67	6,2
9,0	26	0,5	26	11,8	100	1,38	0,69	6,9
9,5	27	0,5	26,5	12,0	112	1,42	0,71	7,6
10,0	27	0,5	27	12,3	124	1,45	0,73	8,3
10,5	27	0,5	27	12,3	137	1,45	0,73	9,0
11,0	28	0,5	27,5	12,5	149	1,49	0,75	9,8
11,5	28	0,5	28	12,8	162	1,53	0,77	10,5
12,0	29	0,5	28,5	13,0	175	1,57	0,79	11,3



## References

- 1) Saul, A. G. A., "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure," *Magazine of Concrete Research*, Vol 2, No.6, March 1951, pp. 127-140.
- 2) Malhotra, V. M., "Maturity Concept and the Estimation of Concrete Strength," *Information Circular IC 277*, Dept. of Energy Mines Resources (Canada), Mines Branch, Nov. 1971, 43 pp.
- 3) Carino, N. J., "The Maturity Method," Chapter 5 in *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 2nd Edition, Malhotra, V. M. and Carino, N. J., Eds., CRC Press Inc., Boca Raton, FL, and ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- 4) Freiesleben Hansen, P., and Pedersen, J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete," *Nordisk Betong*, 1, 1977, pp. 19-34.
- 5) Carino, N. J., "The Maturity Method: Theory and Application," *ASTM Journal of Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol 6, No.2, Winter 1984, pp. 61-73.
- 6) Tank, R. C., and Carino, N. J., "Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol 88, No.1, Jan;-Feb. 1991, pp. 74-83.
- 7) Carino, N. J., and Tank, R. C., "Maturity Functions for Concrete Made with Various Cements and Admixtures," *ACI Materials Journal*, Vol 89, No.2, March-April 1992, pp. 188-196.
- 8) Knudsen, T., "On Particle Size Distribution in Cement Hydration," *Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cement* (Paris, 1980), Editions Septima, Vol II, 1-170-175.

## Referensi

- 1) Saul, A. G. A., "Principles' Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 2, No.6, March 1951, pp. 127-140.
- 2) Malhotra, V. M., "Maturity Concept and the Estimation of Concrete Strength," *Information Circular IC 277*, Dept. of Energy MinesResources (Canada), Mines Branch, Nov. 1971, 43 pp.
- 3) Carino, N. J., "The Maturitas Method," Chapter 5 in *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 2nd Edition, Malhotra, V. M. and Carino, N. J., Eds., CRC Press Inc., Boca Raton, FL, and ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- 4) Freiesleben Hansen, P., and Pedersen, J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete," *Nordisk Betong*, 1, 1977, pp. 19-34.
- 5) Carino, N. J., "The Maturity Method: Theory and Application," *ASTM Journal of Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol. 6, No.2, Winter 1984, pp. 61-73.
- 6) Tank, R. C., and Carino, N. J., "Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No.1, Jan;-Feb. 1991, pp. 74-83.
- 7) Carino, N. J., and Tank, R. C., "Maturity Functions for Concrete Madewith Various Cements and Admixtures," *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.2, March-April 1992, pp. 188-196.
- 8) Knudsen, T., "On Particle Size Distribution in Cement Hydration," *Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cement* (Paris, 1980), Editions September, Vol.II, 1-170-175.